

TUGAS AKHIR - TM141585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN PADA
IRIGASI SALURAN AKAR MENGGUNAKAN JARUM
SIDE-VENTED METODE TEKANAN POSITIF DAN
OPEN-ENDED TEKANAN NEGATIF**

WILLIAM FERNANDO
NRP 2115 105 058

Dosen Pembimbing
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

TUGAS AKHIR – TM141585

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN PADA
IRIGASI SALURAN AKAR MENGGUNAKAN
JARUM *SIDE-VENTED* METODE TEKANAN
POSITIF DAN *OPEN-ENDED* TEKANAN NEGATIF**

WILLIAM FERNANDO
NRP 2115 105 058

Dosen Pembimbing:
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

Program Sarjana
Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017

FINAL PROJECT – TM141585

**NUMERICAL STUDY OF FLOW
CHARACTERISTICS IN ROOT CANAL
IRRIGATION USING SIDE-VENTED NEEDLE
WITH POSITIVE PRESSURE AND OPEN-ENDED
NEEDLE WITH NEGATIVE PRESSURE METHODS**

WILLIAM FERNANDO
NRP 2115 105 058

Advisory Lecturer
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

Bachelor Degree Program
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN
PADA IRIGASI SALURAN AKAR MENGGUNAKAN
JARUM *SIDE-VENTED* METODE TEKANAN
POSITIF DAN *OPEN-ENDED* TEKANAN NEGATIF**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

WILLIAM FERNANDO

NRP. 2115 105 058

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT. (Pembimbing)
NIP. 197104051997021001
2. Vivien Suphandani, ST., M.Eng., Ph.D. (Penguji I)
NIP. 198105292003122001
3. Ir. Nur Ikhwan, M.Eng.Sc. (Penguji II)
NIP. 196709151995121001
4. Dedy Zulhidayat Noor, ST., MT., Ph.D. (Penguji III)
NIP. 197512062005011000

**SURABAYA
JULI, 2017**

**STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN PADA
IRIGASI SALURAN AKAR MENGGUNAKAN JARUM
SIDE-VENTED METODE TEKANAN POSITIF DAN
OPEN-ENDED TEKANAN NEGATIF**

Nama Mahasiswa : William Fernando
NRP : 2115 105 058
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

Abstrak

Perawatan saluran akar sangat penting untuk mempertahankan gigi tetap berfungsi dengan baik. Faktor keberhasilan perawatan adalah dengan tersingkirnya sisa-sisa jaringan pulpa mati, bakteri dan toksin dari sistem saluran akar dengan mekanisme pembilasan fluida irigan pada saluran akar terutama pada bagian apikal atau pada bagian yang sulit dijangkau oleh instrument mekanis. Metode irigasi endodontik meliputi jarum suntik dengan tekanan positif dan tekanan negatif. Kedua metode memiliki karakteristik aliran dan pola irigasi yang berbeda terhadap daerah kanal sehingga perlu dianalisa untuk efektifitas pembersihan yang optimal.

Model uji yang digunakan dalam penelitian secara numerik ini berupa saluran akar yang berbentuk *frustum* dengan diameter apikal 0,45 mm dan *taper* 7%. Pengujian dilakukan dengan variasi jarum dan variasi metode tekanan yaitu jarum yang berbentuk *side-vented* dengan tekanan positif dan jarum *open-ended* dengan tekanan negatif. Saluran akar juga divariasikan dengan panjang 20,5 mm, 20,9 mm dan 21,5 mm untuk metode tekanan positif dan panjang 20,5 mm dan 21,5 mm untuk tekanan negatif. Jarum dimodelkan dengan penampang berbentuk silinder. Jarum untuk kedua metode berdiameter 0,196 mm dengan panjang 25 mm untuk tekanan positif sedangkan pada metode negatif

memiliki panjang 20 mm. Kedalaman penyisipan jarum sepanjang 2 mm dari ujung apikal pada tekanan positif dan 10 mm dari bagian orifis saluran akar pada tekanan negatif. Fluida irigan berupa *sodium hypochlorite* 2,5% dengan densitas ρ 1060 kg/m³ dan viskositas μ 0,001073 kg/m.s yang dimodelkan *laminar flow* dengan aliran bersifat *incompressible flow*, *viscous* dan *steady-flow*. Laju aliran jarum sebesar 0,2 mL/s. Tekanan hisap pada *outlet* untuk metode tekanan negatif sebesar -20kPa. Pengukuran dilakukan pada ujung jarum hingga apikal yang dibagi menjadi 12 *section*.

Dari hasil studi numerik yang dilakukan didapatkan hasil berupa visualisasi aliran seperti profil kecepatan kontur dan *pathlines*, kontur *wall shear stress* dan nilai tekanan dinamis, dimana hasil tersebut menunjukkan jika variasi panjang saluran akar tidak begitu signifikan terhadap pola aliran. bentuk ujung jarum yang berbeda yaitu *side-vented* dengan metode tekanan positif dan *open-ended* dengan tekanan negatif menghasilkan pola aliran yang berbeda secara signifikan. Variasi metode tekanan positif dan negatif juga mempengaruhi besarnya kecepatan aliran, *wall shear stress* dan tekanan dinamis. Irigasi saluran akar dengan tekanan negatif menggunakan jarum *open-ended* menghasilkan aliran sampai ujung apikal dan memenuhi syarat untuk terjadinya pertukaran irigan dibanding dengan irigasi tekanan positif dengan jarum *side-vented* yang tidak sampai ujung apikal. Dapat disimpulkan irigasi saluran akar dengan metode tekanan negatif lebih efektif dan lebih optimal untuk melakukan pembersihan debris, bakteri, dan jaringan mati hingga ujung apikal saluran akar dibanding dengan irigasi dengan metode tekanan positif menggunakan jarum *side-vented*.

Kata kunci: metode komputasi fluida, irigasi saluran akar, jarum, tekanan positif, tekanan negatif

NUMERICAL STUDY OF FLOW CHARACTERISTICS IN ROOT CANAL IRRIGATION USING SIDE-VENTED NEEDLE WITH POSITIVE PRESSURE AND OPEN- ENDED NEEDLE WITH NEGATIVE PRESSURE METHODS

Nama of Student : William Fernando
NRP : 2115 105 058
Department : Mechanical Engineering
Counselor Lecturer : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

Abstract

Root canal treatment is very important to keep the tooth functioning properly. The effectiveness of treatment relies on the removal of dead pulp tissue, bacteria and toxins from the root canal system by mechanical flushing on the root canal especially from areas of the root canal that have been left unprepared by mechanical instruments. The methods of endodontic irrigation included a syringe-needle with positive pressure and negative pressure. Both methods had different flow characteristics and irrigation patterns on the root canal. The aim of this study to characterize the irrigation dynamics with different methods and different needle tip design for optimal cleaning effectiveness, using computational fluid dynamics model.

The root canal was simulated as a geometrical frustum of a cone with an apical diameter of 0.45 mm and 7% taper. Two different methods were modeled as the modes of irrigation which had various needle tip design, side-vented needle for the positive pressure and open-ended tip design for negative pressure methods. Three different length of root canal were simulated for positive pressure, namely 20.5 mm, 20.9 mm and 21.5 mm while there were 2 variations for negative pressure, 20.5 mm and 22.5 mm. For both methods, the needles were modeled as a cylinder with an internal

diameter of 0.196 mm, a length of 25 mm for side-vented needle and a length of 20 mm for open-ended needle. The needles were fixed and centered within the canal. The needles were considered to be placed 2 mm short of the working length for positive pressure method and 10 mm from canal orifice for negative pressure methods. The irrigation fluid, sodium hypochlorite 2.5% aqueous solution, was modelled as an incompressible, viscous and steady flow with density, ρ , equal to 1060 kg/m³ and viscosity, μ 0.001073 kg/m-s. The inlet flow rate was set to 0.2 mL/s at the top of needle. The top of root canal was specified as an outlet pressure boundary which was set at atmospheric pressure for positive pressure and was defined -20 kPa for negative pressure. The velocity profiles were extracted from twelve cross-sectional locations along the root canal.

The result of this numerical study shows visualization of flow such velocity profile, contour and pathlines, wall shear stress contour and dynamic pressure value, which the variation of root canal length appeared to have limited influence on the general characteristics of the flow pattern developed. However, both of needle tip designs produced different flow pattern. Variations of positive and negative pressure method also affected the flow velocity, wall shear stress and dynamic pressure. Negative pressure method used open-ended needle led to a more extensive irrigant exchange apically to its tip if compared with positive pressure method. The insertion depth of 2 mm at positive pressure irrigation is less effective and required closer placement of approximately 1 mm from apical to be optimal. In conclusion, root canal irrigation with negative pressure method was more effective and more optimal for cleaning debris, bacteria and dead tissue up to apical foramen compared with positive pressure irrigation using side-vented needle.

Keywords: Computational fluid dynamics, irrigation, needle, positive pressure, negative pressure

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yesus yang telah memberikan anugerah dan kasih-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan laporan tugas akhir ini tepat pada waktunya. Laporan ini mengambil judul:

STUDI NUMERIK KARAKTERISTIK ALIRAN PADA IRIGASI SALURAN AKAR MENGGUNAKAN JARUM *SIDE-VENTED* METODE TEKANAN POSITIF DAN *OPEN-ENDED* TEKANAN NEGATIF

Penulis menyadari bahwa dalam penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis menghaturkan ucapan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Kedua orang tua penulis, atas kasih, ilmu dan dukungan yang telah beliau berikan kepada penulis.
2. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing dan dosen wali yang selalu memberi bimbingan serta arahan bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini dan selama masa studi penulis.
3. Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng., Ph.D., selaku ketua jurusan teknik mesin FTI-ITS.
4. Vivien Suphandani, S.T., M.Eng., Ph.D.; Ir. Nur Ikhwan, M.Eng.Sc.; Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.,D., selaku dosen penguji yang memberi banyak arahan dan masukan serta kritikan yang sangat membangun.
5. Seluruh dosen dan tenaga pendidik Teknik Mesin FTI-ITS yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas ilmu yang telah diajarkan kepada penulis.
6. Mas Dani, Pak Andi dan karyawan lainnya, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas izin ruangan yang diberikan dan membantu penulis.

7. Saudara kandung penulis, Devi Elizabeth dan Grace Nathalia, yang selalu memberi perhatian dan semangat bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Nanda Cyntia terkasih, yang senantiasa selalu memberikan perhatian, dukungan dan doa bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
9. Fajar Dwi Yudanto, Gigih, Elfandi dan lain-lain, sebagai tempat bertanya dan yang memberi bantuan serta masukan masukan sampai tugas akhir ini selesai.
10. Teman-teman lintas jalur 2015, yang tidak dapat disebutkan namanya satu per satu atas pengalaman suka dan duka yang telah dilewati.
11. Drg. Dani Rudianto, selaku dokter yang memberikan saran dan informasi dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dan terdapat kekurangan. penulis mengharapkan kritik dan saran untuk perbaikan dimasa depan. Semoga tugas akhir ini bisa bermanfaat untuk kita semua.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	6
1.3 Batasan Masalah.....	6
1.4 Tujuan Penelitian.....	7
1.5 Manfaat Penelitian.....	8

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori.....	9
2.1.1 <i>Root canal irrigation</i>	9
2.1.2 Deskripsi dan Klasifikasi Fluida sebagai <i>Continuum</i>	11
2.1.3 Fluida <i>Newtonian</i> dan <i>Non-Newtonian</i>	12
2.1.4 Aliran <i>Viscous</i> dan <i>Non-Viscous</i>	15
2.1.5 Aliran Laminar dan Turbulen	15
2.1.6 Aliran Inkompresibel dan kompresibel.....	18
2.1.7 Aliran Internal dan Eksternal	18
2.2 Penelitian Terdahulu.....	19
2.2.1 Penelitian dengan Variasi Desain Jarum.....	21
2.2.2 Penelitian dengan Variasi Kedalaman Penyisipan Jarum	23
2.2.3 Penelitian Numerik Mengenai Desain Ujung Jarum.....	24
2.2.4 Penelitian dengan Variasi Metode	25

2.2.5 Penelitian dengan Variasi Debit	27
2.2.6 Penelitian dengan Variasi Panjang Kerja dan Debit.....	29

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Geometri Benda Uji	34
3.2 Metode Numerik.....	35
3.2.1 Tahap <i>Pre-Processing</i>	35
3.2.2 Tahap <i>Post Processing</i>	38
3.3 Langkah Penelitian	45
3.4 Analisa <i>Grid Independency</i>	46
3.5 <i>Flowchart</i> Penelitian	49

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Perbandingan Hasil Data sepanjang Saluran Akar	52
4.1.1 Perbandingan Hasil Data sepanjang Saluran Akar pada Irigasi Metode Tekanan Positif	52
4.1.2 Perbandingan Hasil Data sepanjang Saluran Akar pada Irigasi Metode Tekanan Negatif.....	63
4.2 Visualisasi Kontur Kecepatan Setiap <i>Surface</i> <i>Cross-Section</i>	72
4.2.1 Visualisasi Kontur Kecepatan Setiap <i>Surface</i> <i>Cross-Section</i> pada Metode Tekanan Positif	73
4.2.2 Visualisasi Kontur Kecepatan Setiap <i>Surface</i> <i>Cross-Section</i> pada Metode Tekanan Negatif.....	74
4.3 Perbandingan Data Irigasi Tekanan Positif dan Tekanan Negatif	77

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan.....	87
5.2 Saran.....	88

DAFTAR PUSTAKA	89
-----------------------------	----

LAMPIRAN

BIODATA PENULIS

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Irigasi saluran akar.....	1
Gambar 2.1	<i>Root canal irrigation</i>	10
Gambar 2.2	Klasifikasi mekanika fluida <i>continuum</i>	11
Gambar 2.3	Deformasi elemen fluida pada saat $t + \delta t$	12
Gambar 2.4	Shear strees dan <i>apparent viscosity</i> sebagai fungsi dari tingkat deformasi untuk aliran satu dimensi dari berbagai cairan <i>Non-newtonian</i>	14
Gambar 2.5	Skema lapisan batas.....	15
Gambar 2.6	Aliran pada daerah masuk pipa.....	19
Gambar 2.7	Kontur dan vektor kecepatan variasi bentuk jarum (Boutsioukis,2010)	22
Gambar 2.8	Grafik tekanan irigan pada bagian apikal (Boutsioukis,2010)	23
Gambar 2.9	Distribusi kecepatan irigan terhadap fungsi jarak WL (Boutsioukis,2010)	23
Gambar 2.10	Distribusi tegangan geser pada jarum <i>side-vented</i> (Chen, 2013)	26
Gambar 2.11	Model uji saluran akar dan jarum (Boutsioukis,2009)	27
Gambar 2.12	<i>Streamlines</i> berdasarkan <i>velocity magnitude</i> (Boutsioukis,2009)	29
Gambar 2.13	Model uji saluran akar dan jarum (Kocharian, 2010).....	30
Gambar 2.14	Kontur kecepatan dengan pengaturan variasi metode (Kocharian,2010).....	31
Gambar 2.15	Perbandingan kontur kecepatan pada <i>section 6</i> setiap pengaturan (Kocharian,2010)...	32
Gambar 3.1	Permodelan saluran.....	34
Gambar 3.2	<i>Meshing</i> metode tekanan positif	36
Gambar 3.3	<i>Meshing</i> metode tekanan negatif	37
Gambar 3.4	Kondisi batas	38
Gambar 3.5	Posisi pengambilan data metode tekanan	

	positif jarum <i>side-vented</i>	42
Gambar 3.6	Posisi pengambilan data metode tekanan negatif jarum <i>open ended</i>	42
Gambar 3.7	Posisi pengambilan data <i>line/rake</i> tekanan positif.....	43
Gambar 3.8	Posisi pengambilan data <i>line/rake</i> tekanan negatif.....	44
Gambar 3.9	Posisi pengambilan data kecepatan pada <i>outlet cone</i>	45
Gambar 3.10	Grafik <i>grid independency</i> metode tekanan positif dan tekanan negatif.....	48
Gambar 3.11	<i>Flowchart</i> penelitian.....	49
Gambar 4.1	Perbandingan profil kecepatan tekanan positif pada $x=0$	53
Gambar 4.2	Perbandingan profil kecepatan tekanan positif pada $z=0$	54
Gambar 4.3	Grafik kecepatan kerja tekanan positif	57
Gambar 4.4	Kontur <i>wall shear stress</i> untuk metode tekanan positif.....	59
Gambar 4.5	Grafik <i>wall shear stress</i> untuk metode tekanan positif.....	60
Gambar 4.6	Kontur <i>dynamic pressure</i> dan grafik perbandingan variasi pada ujung apikal	61
Gambar 4.7	Grafik <i>dynamic pressure</i>	62
Gambar 4.8	Perbandingan profil kecepatan tekanan negatif	64
Gambar 4.9	Grafik kecepatan tekanan negatif	66
Gambar 4.10	Kontur <i>wall shear stress</i> dan grafik perbandingan untuk metode negatif.....	68
Gambar 4.11	Visualisasi kontur tekanan dinamis untuk metode negatif	69
Gambar 4.12	Grafik tekanan dinamis untuk metode negatif ..	71
Gambar 4.13	Visualisasi kontur kecepatan pada <i>surface cross-section</i> untuk metode tekanan positif.....	74
Gambar 4.14	Visualisasi kontur kecepatan pada <i>surface</i>	

	<i>cross-section</i> untuk metode tekanan negatif.....	75
Gambar 4.15	Perbandingan kontur dan <i>pathlines</i> kedua metode	79
Gambar 4.16	Grafik perbandingan kecepatan pada saluran akar untuk kedua metode	79
Gambar 4.17	Grafik perbandingan kecepatan pada <i>outlet</i> saluran akar	80
Gambar 4.18	Perbandingan kontur tegangan geser kedua metode	81
Gambar 4.19	Grafik Perbandingan tegangan geser kedua metode	82
Gambar 4.20	Grafik perbandingan gradien kecepatan	83
Gambar 4.21	Grafik perbandingan <i>dynamic pressure</i> kedua metode	84
Gambar 4.22	Perbandingan <i>surface cross-section</i> kedua metode	85

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Penelitian terdahulu	20
Tabel 2.2	Verifikasi <i>grid independency</i> pada domain komputasi (Di Zhang, 2013)	25
Tabel 2.3	Kondisi <i>inlet</i> untuk 5 kasus (Boutsioukis, 2009).....	28
Tabel 2.4	Hasil simulasi (Kocharian, 2010).....	30
Tabel 3.1	Posisi pengambilan data pada metode tekanan positif.....	41
Tabel 3.2	Posisi pengambilan data pada metode tekanan negatif.....	42
Tabel 3.3	Verifikasi <i>grid independency</i> tekanan positif pada $y=2$ mm dari apikal	47
Tabel 3.3	Verifikasi <i>grid independency</i> tekanan negatif pada $y=1$ mm dari apikal	47
Tabel 4.1	Perbandingan data hasil simulasi metode tekanan positif dan negatif.....	77

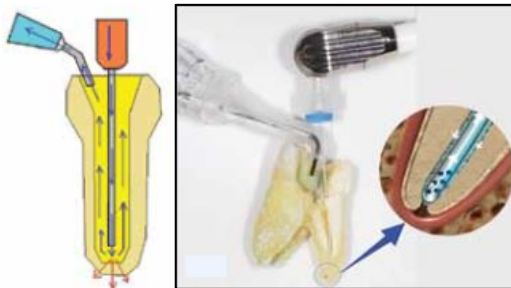
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam usaha mempertahankan gigi tetap berfungsi dengan baik, salah satu perawatan yang dilakukan yaitu perawatan saluran akar. Saluran akar berada dibawah enamel atau lapisan terluar gigi yang dikelilingi oleh jaringan-jaringan lunak seperti jaringan pulpa, jaringan ikat dll. Perawatan saluran akar adalah perawatan yang dilakukan dengan mengangkat jaringan pulpa yang telah terinfeksi, mikroorganisme, debris, serbuk dentin dari saluran akar dengan cara mekanisme pembilasan dari larutan fluida asam dengan jarum suntik lalu dibilas dengan aquades (H_2O). Secara umum, faktor utama keberhasilan irigasi saluran akar adalah dengan tersingkirnya sisa-sisa jaringan pulpa yang telah mati, bakteri dan toksin dari sistem saluran akar. Untuk efektifitas optimal, larutan irigasi harus mengalami kontak langsung dengan seluruh daerah kanal terutama bagian apikal atau ujung saluran akar serta untuk area yang tidak benar-benar dipersiapkan untuk instrumen mekanik.



Gambar 1.1 Irigasi saluran akar (Kurtzman, 2012)

Menurut penelitian **Peters** (2001), ditunjukkan bahwa kurang lebih 35% dari saluran akar tidak tersentuh oleh instrumen endodontik karena kompleksitas anatomi. Metode irigasi endodontik saat ini meliputi jarum suntik irigasi tradisional (tekanan positif) dan irigasi tekanan negatif. Jarum tekanan positif pada prinsipnya menyembrotkan fluida ke dalam saluran akar lalu bergerak keluar dengan sendirinya sedangkan pada metode tekanan negatif diberikan efek vakum atau sedotan untuk membantu fluida bergerak keluar dari saluran. Kedua metode ini berpengaruh terhadap pergerakan larutan irigasi ke apikal dan interaksi larutan dengan dinding kanal. Setiap metode irigasi memiliki karakteristik aliran yang berbeda dan menghasilkan efektifitas pembersihan yang juga berbeda.

Pada irigasi saluran akar dengan metode tekanan positif, terdapat beberapa desain ujung jarum seperti jarum *flat (open-ended)*, *side-vented*, *multi-vented* dll. Pada tekanan negatif hanya digunakan desain jarum *open-ended*. Jarum *open-ended* memiliki lubang pada ujungnya sementara jarum *side-vented* celahnya berada pada bagian samping dan ujungnya berbentuk *close-ended*. Variasi kedalaman penyisipan jarum, variasi debit irigan, dan variasi lainnya juga dilakukan untuk mendapatkan hasil pembersihan yang optimal selain variasi metode tekanan dan bentuk jarum. Dinamika fluida aliran irigan pada saluran akar berkaitan dengan pola aliran irigasi, penetrasi fluida dan gaya yang dihasilkan dalam saluran akar. Secara tradisional, pengujian *in vitro* model saluran akar digunakan untuk memvisualisasikan dan menganalisa aliran irigasi. Eksperimen ini sulit untuk dilaksanakan karena keterbatasan cara pengujian dan mahal. Hasil yang ditunjukkan terbatas dan tidak langsung disebabkan oleh pendekatan makroskopik yang hanya dapat memberikan estimasi kasaran dan kurang lengkap dari aliran irigasi.

Metode komputasi fluida (*CFD*) merupakan penelitian yang biasanya berhubungan dengan fenomena skala besar. Akan tetapi masalah aliran fluida pada sistem irigasi saluran akar ada pada tingkat mikroskopik. Komputasi dinamika fluida merupakan alat yang ampuh untuk menyelidiki pola aliran dan fenomena fisik dan kimia dengan pemodelan matematika dan simulasi komputer. Studi *CFD* telah diterapkan dengan potensi besar untuk mempelajari pola aliran larutan irigasi setiap metode pembersihan baik tekanan positif ataupun tekanan negatif serta dapat memberikan rincian tentang kecepatan, tegangan geser dan tekanan dimana eksperimen pengukuran sulit untuk dilakukan pada aliran mikro.

Studi sebelumnya telah menunjukkan bahwa efektifitas penetrasi dan pembilasan tergantung pada anatomi sistem saluran akar dan sistem penghantarannya, volume dan sifat fluida irigasi serta jenis, ukuran dan kedalaman penyisipan jarum irigasi. Beberapa penelitian simulasi terdahulu membahas dan memvisualisasikan mengenai dinamika aliran pada saluran akar dengan berbagai jenis variasi, seperti penelitian **Boutsioukis dkk (2009)** yang melakukan penelitian mengenai variasi debit aliran terhadap bentuk aliran. Anatomi saluran akar memiliki panjang 19 mm, diameter lubang kanal 1,59 mm dan 0,45 mm pada bagian apikal. Metode irigasi tekanan positif menggunakan jarum berbentuk *side-vented* dengan $D = 0,45$ mm dan $L = 32$ mm. Fluida yang digunakan adalah NaOCl 1% dengan 5 variasi debit yaitu 0,02 mL/s, 0,14 mL/s, 0,26 mL/s, 0,53 mL/s dan 0,79 mL/s. Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan efek variasi debit sangat berpengaruh dalam menentukan medan aliran didalam kanal karena kecepatan *inlet* yang meningkat.

Pada tahun **2010**, **Boutsioukis dkk** melakukan 2 penelitian sekaligus. Peneliti melakukan studi numerik untuk mengevaluasi aliran irigan pada saluran akar dengan menggunakan tipe desain jarum yang berbeda. Variasi yang

digunakan peneliti adalah 6 tipe jarum yang berbeda yaitu jarum *open-ended* (*flat, beveled, notched*) dan *close-ended* (*side-vented, double side vented, multivented*). Anatomi saluran akar dan fluida yang digunakan sama seperti penelitian sebelumnya. Jarum diletakkan pada posisi 3 mm panjang kerja dari ujung apikal. Penelitian ini menyimpulkan bahwa bentuk aliran jarum *open-ended* berbeda dengan aliran jarum *close-ended* dimana jarum *open-ended* menghasilkan pertukaran irigan yang lebih jauh dari ujung jarum serta tekanan yang lebih besar.

Boutsoukis dkk (2010) mengembangkan penelitiannya mengenai endodontik. Penelitian ini membahas efek kedalaman penyisipan jarum pada aliran irigan di saluran akar. Variasi kedalaman penyisipan jarum ditentukan yaitu 1,2,3,4 dan 5 mm panjang kerja dari apikal. Metode yang digunakan adalah tekanan positif dengan 2 tipe jarum yaitu *open-ended* dan *side-vented*. Anatomi saluran akar, dimensi jarum dan fluida irigan sama seperti penelitian sebelumnya. Hasil yang didapat adalah bentuk aliran tidak memiliki banyak perbedaan terhadap variasi jarak. Namun perbedaan bentuk aliran lebih terlihat jika dibandingkan antara kedua bentuk jarum. Jarum *open-ended* mengalami pertukaran irigan yang lebih luas.

Kocharian dkk (2010) melakukan penelitian berbasis *CFD* tentang kecepatan, tegangan geser dinding dan tekanan pada dinding saluran akar. Bentuk saluran akar sepanjang 18 mm dengan diameter lubang kanal 1,57 mm dan 0,45 mm pada bagian apikal. Jarum yang digunakan sebagai penelitian adalah jarum *side-vented* dengan tekanan positif yang memiliki panjang 31 mm dan diameter 0,196 mm. Fluida irigan menggunakan air suling dengan densitas $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m-s}$. Variasi pada penelitian ini adalah variasi debit sebesar 0,15 mL/s dan 0,30 mL/s serta variasi kedalaman penyisipan jarum yaitu 2 mm dan 3 mm panjang kerja. Dari penelitian ini disimpulkan memvariasikan debit dan posisi tidak mengubah bentuk aliran, namun hanya

mempengaruhi besarnya kecepatan, tegangan geser dan tekanan pada saluran akar.

Penelitian numerik dan simulasi *CFD* juga dilakukan **Chen dkk (2013)** mengenai karakteristik dinamika irigan dengan metode yang berbeda, yaitu tekanan positif (*open-ended* dan *side-vented*), tekanan negatif dan irigasi pasif dengan bantuan ultrasonik. Anatomi saluran akar sepanjang 18 mm, diameter lubang kanal 1,57 mm dan 0,45 mm pada bagian apikal. Fluida yang digunakan adalah air suling dengan densitas $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$, viskositas $\mu = 1,0 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$. Hasil dari penelitian didapat bentuk aliran irigan yang berbeda dari 4 grup yang diteliti. Jarum *open-ended* memiliki kecepatan yang terbesar, sementara tegangan geser dinding terkecil terjadi pada irigasi pasif dengan bantuan ultrasonik. Untuk metode irigasi dengan jarum, tegangan geser dinding terbesar berada pada jarum *side-vented*. Studi ini menghasilkan pandangan dinamika fluida dengan berbagai metode.

Pada penelitian **Di Zhang dkk (2013)**, penelitian yang dilakukan mengenai pengaruh variasi desain ujung jarum yang berbentuk datar, cekung dan cembung dan dengan memvariasikan laju aliran (debit) pada 0,02 mL/s, 0,16 mL/s hingga 0,260 mL/s. Penelitian menggunakan jarum *side-vented* dengan metode tekanan positif dan melakukan *grid independency* untuk meningkatkan akurasi dan variasi model. Dari verifikasi *grid independency* dipilih tipe mesh dengan jumlah nodes 2,12 juta karena memiliki error yang paling kecil.

Pada penelitian terdahulu, belum dilakukan penelitian spesifik mengenai 2 metode menggunakan jarum yaitu tekanan positif dan tekanan negatif. Analisa *CFD* berguna untuk memahami bagaimana teknik irigasi yang berbeda dapat mempengaruhi pola irigasi ke apikal dan interaksi irigan dengan dinding saluran akar. Dengan begitu didapatkan kecepatan, tegangan geser dan tekanan irigan pada saluran akar sehingga dapat mengelaborasi efek aliran dan membandingkan

karakteristik kedua metode untuk mengetahui efektifitas pembersihan optimal.

1.2 Rumusan Masalah

Faktor utama keberhasilan perawatan saluran akar adalah dengan tersingkirnya sisa-sisa jaringan pulpa yang telah mati, bakteri dan toksin dari sistem saluran akar. Larutan irigasi harus mengalami kontak langsung dengan seluruh daerah kanal terutama bagian apikal saluran akar serta untuk area yang tidak benar-benar dipersiapkan untuk instrumen mekanik. Metode menggunakan jarum yang saat ini banyak digunakan adalah tekanan positif dan tekanan negatif. Metode tekanan positif menggunakan jarum *side-vented* dan metode tekanan negatif memiliki pengaruh berbeda terhadap pergerakan larutan irigasi sehingga dibutuhkan analisa mikroskopis untuk membuktikan metode mana yang lebih efektif dan optimal dalam pembersihan.

Penelitian ini menggunakan *tool CFD* untuk menginvestigasi karakteristik pola aliran yang melintasi jarum *side-vented* bertekanan positif maupun jarum *open-ended* tekanan negatif dan pada sepanjang saluran akar hingga apikal dengan model matematika dan simulasi. Simulasi *CFD* dapat memberikan detail tentang kecepatan, tegangan geser dan tekanan pada area yang sulit ditunjukkan dengan penelitian eksperimen sehingga dapat dianalisa efek dari variasi metode tekanan dan variasi geometri saluran akar terhadap keberhasilan pembersihan.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini diberikan beberapa batasan yang berisi tentang variabel yang akan diteliti maupun variabel yang akan diasumsikan sehingga bahasan tidak melebar dari tujuan utama. Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini, yaitu:

- 1) Metode tekanan positif menggunakan jarum *side-vented* dan tekanan negatif dengan jarum *open-ended*.
- 2) Suntikan yang digunakan untuk kedua metode sama dengan debit 0,2 mL/s sekali tekan.
- 3) Fluida irigan menggunakan *sodium hypochlorite* 2,5% yang dimodelkan fluida *Newtonian*, inkompresibel, *viscous*.
- 4) Temperatur fluida kerja diatur 27°C.
- 5) Tidak menganalisa fenomena perpindahan panas yang ditimbulkan oleh gesekan dari *wall*.
- 6) Kekasaran permukaan dinding pada jarum dan saluran akar diabaikan (*smooth wall*).
- 7) Aliran *steady* dan *uniform* dari *inlet*

1.4 Tujuan Penelitian

Secara umum, tujuan dari penelitian ini adalah melakukan simulasi untuk mengetahui pengaruh variasi metode tekanan positif dan negatif terhadap pola aliran agar dapat diketahui metode pembersihan yang efektifitasnya paling optimal. Selain itu terdapat tujuan khusus untuk menganalisa baik dalam bentuk kuantitatif maupun kualitatif pada kajian numerik ini, berikut tujuan khusus penelitian ini:

- Mengetahui *velocity profile* aliran irigan
- Mengetahui *wall shear stress* pada dinding kanal
- Mengetahui *pressure* pada saluran akar
- Mengetahui jarak terjauh pertukaran irigan pada saluran akar

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat setelah melakukan penelitian studi numerik ini adalah sebagai berikut:

- 1) Memberikan gambaran kualitatif dan kuantitatif mengenai karakteristik aliran fluida yang melintasi jarum pada saluran akar dengan variasi metode tekanan positif dan tekanan negatif.
- 2) Memberikan penjelasan tentang metode mana yang lebih efektif untuk membersihkan saluran akar.
- 3) Memberikan pengetahuan dalam penggunaan *software CFD* untuk menyelesaikan permasalahan medis dan fenomena mikroskopis.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dasar Teori

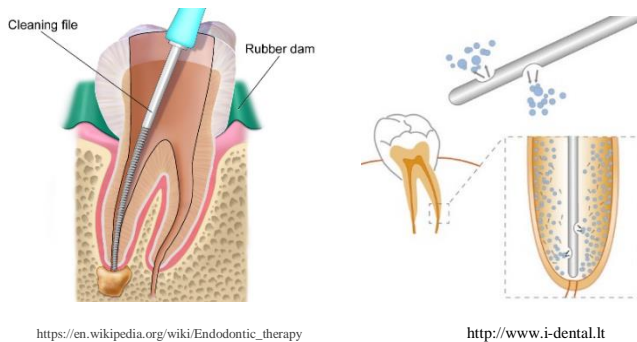
Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan serta dilengkapi pula dengan referensi mengenai penelitian-penelitian yang terkait.

2.1.1 *Root Canal Irrigation*

Root canal atau saluran akar merupakan bagian gigi yang berada dibawah enamel atau email yang terdapat jaringan lunak disebut jaringan pulpa. Jaringan pulpa banyak mengandung serat saraf termasuk arteri, pembuluh darah, pembuluh getah bening dan jaringan ikat. Setiap saraf ini masuk ke gigi melalui ujung saluran akar atau apikal. Gigi memiliki paling tidak 1 saluran akar dan maksimal 4. Perawatan saluran akar adalah pendekatan non-bedah yang digunakan untuk mengobati dua hal yang berbeda yaitu menjaga kesehatan yang ada di sekitar apikal saluran akar untuk mencegah penyakit atau mengobati jaringan pulpa yang mati atau terinfeksi. Terapi saluran akar ini sangat diperlukan karena gigi tidak dapat sembuh dengan sendirinya. Tanpa pengobatan, infeksi akan menyebar, tulang disekitar gigi memburuk hingga gigi akan terlepas.

Terapi saluran akar adalah prosedur yang digunakan untuk menghilangkan pulpa yang rusak atau mati dengan mekanisme pembilasan menggunakan fluida irigan seperti *sodium hypochlorite*. Irgan memfasilitasi pemindahan mikroorganisme, sisa jaringan, debris dentin keluar dari saluran akar. Pembersihannya dengan metode kering yaitu tanpa ada irigan didalam saluran akar sebelum fluida

diinjeksikan dari jarum atau keadaan kering. Irigan harus mengalami kontak langsung dengan keseluruhan area kanal hingga bagian apikal untuk efektifitas yang optimal. Setelah itu saluran akar dibilas kembali dengan aquades (H_2O) agar sifat dari fluida asam bersih dari saluran akar. Kemudian saluran akar diisi dengan zat seperti karet yang disebut *gutta-percha* untuk mencegah rekontaminasi dan ditutup dengan paduan logam.

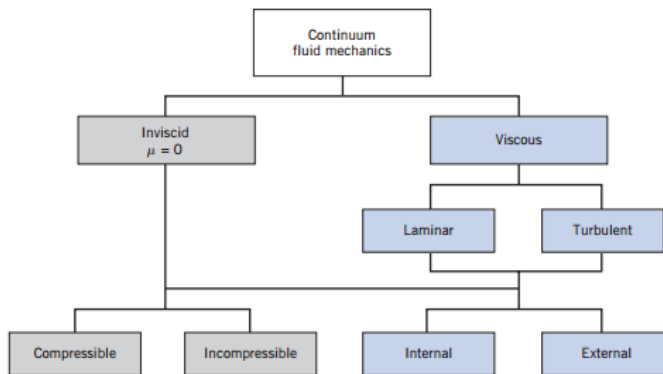


Gambar 2.1 *Root canal irrigation*

Pembilasan irigan yang ada saat ini masih menggunakan jarum sebagai penghantar. Umumnya pembilasan irigan adalah dengan metode tekanan positif dan metode tekanan negatif. Pada metode tekanan positif, fluida irigan diinjeksikan melalui jarum dan memenuhi saluran akar sampai bergerak keluar. Metode tekanan negatif memiliki tekanan hisap ketika proses pembersihan pada bagian *cone orifice*. Tekanan hisap ini membantu mempercepat pergerakan irigan keluar dari saluran akar ketika diinjeksikan dari jarum. Semakin baik pergerakan irigan maka semakin efektif dalam pembersihan karena jaringan mati, mikroorganisme dan dentin dapat keluar dari saluran akar.

2.1.2 Deskripsi dan Klasifikasi Fluida sebagai *Continuum* (Rangkaian Kesatuan)

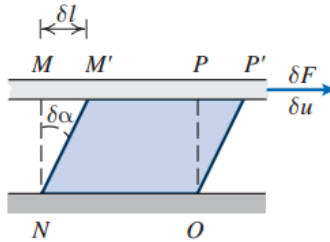
Fluida kenyataannya terdiri sebagai molekul-molekul yang bergerak. Pada berbagai aplikasi bidang *engineering* lebih diarahkan pada pengaruh rata-rata atau pengaruh mikroskopik dari gerakan molekul-molekul fluida. Selanjutnya pengaruh tersebut dapat dirasakan maupun diukur, sehingga fluida diperlakukan sebagai suatu zat yang mampu dibagi tak terhingga. Anggapan bahwa fluida sebagai satu kesatuan makroskopik disebut fluida sebagai *continuum*. Sebagai konsekuensi asumsi *continuum*, setiap properti fluida diasumsikan mempunyai harga tertentu pada setiap titik dalam ruang. Properti fluida seperti densitas (ρ), kecepatan (V), *temperature* (T) dan lain-lain merupakan fungsi kontinu terhadap posisi dan waktu. Kebanyakan *engineer* mengklasifikasikan mekanika fluida *continuum* sebagai berikut:



Gambar 2.2 Klasifikasi mekanika fluida *continuum*
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

2.1.3 Fluida Newtonian dan Non-Newtonian

Viskositas menjelaskan ketahanan internal fluida untuk mengalir dan sebagai pengukuran dari pergeseran fluida. Elemen fluida diantara dua plat sejajar, dimana plat atas bergerak dengan kecepatan konstan, δU yang dikenai gaya konstan δF .



Gambar 2.3 Deformasi elemen fluida pada saat $t + \delta t$
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

Maka tegangan geser τ_{yx} yang diterima fluida tersebut yaitu:

$$\tau_{yx} = \lim_{\delta A_x \rightarrow 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_y} = \frac{dF_x}{dA_y}$$

dimana δA_y , adalah luasan kontak dari elemen fluida dengan plat, selama interval waktu δt , elemen fluida berdeformasi dari posisi MNOP ke posisi M'NOP', dan laju deformasi fluida tersebut yaitu

$$deformation\ rate = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt}$$

Jarak perubahan deformasinya, δl antara titik M dan M' yaitu:

$$\delta l = \delta U \cdot \delta t$$

Sedangkan untuk perubahan sudut yang kecil, maka bentuk lain perubahan δl , yaitu:

$$\delta l = \delta y \cdot \delta \alpha$$

Sehingga laju deformasi dari elemen fluida yang dikenai tegangan geser τ_{yx} dapat ditulis dalam bentuk du/dy . Fluida yang tegangan gesernya berbanding lurus secara linier dengan gradien kecepatan pada arah tegak lurus dengan bidang geser dikenal sebagai fluida *Newtonian*. Fluida ini akan terus mengalir sekalipun tanpa dipengaruhi gaya yang bekerja pada fluida. Hal ini disebabkan karena viskositas dari suatu fluida *Newtonian* tidak berubah ketika terdapat gaya yang bekerja pada fluida. Viskositas dari suatu fluida *Newtonian* hanya bergantung pada temperatur dan tekanan. Contoh umum dari fluida yang memiliki karakteristik ini adalah air. Persamaan fluida *Newtonian* dapat ditulis:

$$\tau_{yx} \propto \frac{du}{dy}$$

Konstanta yang menyatakan berbanding lurus tersebut dinyatakan dengan harga viskositas absolut atau dinamik. Untuk aliran dua dimensi viskositas dari hukum Newton yaitu:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}$$

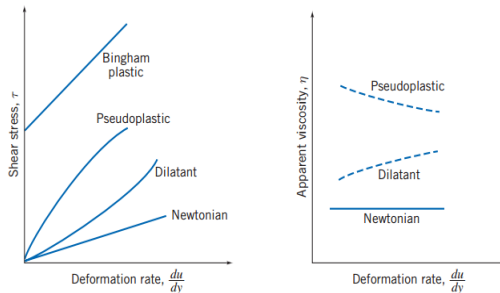
Setiap fluida mempunyai ketahanan terhadap deformasi yang berbeda akibat tegangan geser yang sama. Dalam mekanika fluida, rasio antara viskositas absolut (μ) dengan densitas (ρ) dikenal sebagai viskositas kinematik (ν).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Fluida *non-Newtonian* adalah fluida yang apabila dikenai tegangan geser tersebut tidak sebanding langsung dengan kecepatan deformasi. Untuk berbagai aplikasi *engineering* dimodelkan dengan *power-law* model, dimana untuk aliran satu dimensi ditulis:

$$\tau_{yx} = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n$$

dimana n adalah indeks sifat aliran dan k adalah indeks konsistensi atau koefisien.

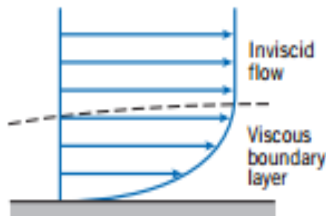


Gambar 2.4 Shear stress dan *apparent viscosity* sebagai fungsi dari tingkat deformasi untuk aliran satu dimensi dari berbagai cairan *Non-Newtonian* (Fox dan Mc. Donald, 2011)

Bentuk $\eta = k |du/dy|^{n-1}$ disebut sebagai *apparent viscosity* atau viskositas semu. Seberapa besar fluida *non-Newtonian* mempunyai *apparent viscosity* relatif lebih tinggi dibanding dengan viskositas air. Fluida dimana *apparent viscosity* menurun dengan meningkatnya laju deformasi ($n < 1$) disebut fluida *pseudoplastis*, contohnya bubur kertas. Sedangkan untuk $n > 1$ dikenal sebagai fluida *dilatant*, sebagai contoh lumpur.

2.1.4 Aliran *Viscous* dan *Non-Viscous*

Mekanika fluida continuum terbagi menjadi dua, yaitu *inviscid* dan *viscous*. Fluida *inviscid* dan *viscous* dipisahkan oleh sebuah batas yang dikenal dengan *boundary layer*. Daerah *inviscid* tidak memiliki efek *viscous* sehingga tegangan gesernya diabaikan.



Gambar 2.5 Skema lapisan batas
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

Daerah yang berada diantara permukaan padat (*solid surface*) dan *boundary layer* adalah daerah yang dipengaruhi efek *viscous*. Efek *viscous* memberikan sumbangan terhadap adanya tegangan geser (*shear stress*). Shear stress pada aliran *viscous* laminar dipengaruhi secara langsung oleh viskositas fluida dan gradient kecepatan yang ada dalam aliran fluida tersebut ($\tau_{yx} \neq 0$). Gaya yang berpengaruh pada aliran fluida ideal (*non-viscous*), hanya *pressure force*, karena dalam aliran tersebut tidak terdapat tegangan geser yang berpengaruh. Aliran *inviscid* tidak dipengaruhi oleh viskositas/kekentalan dan dalam kenyataannya fluida *inviscid* tidak ada.

2.1.5 Aliran Laminar dan Turbulen

Aliran *viscous* terbagi menjadi aliran laminar dan aliran turbulen. Aliran laminar adalah aliran dimana struktur

aliran dibentuk oleh partikel-partikel fluida yang bergerak secara berlapis-lapis, dimana setiap lapisan bergerak diatas lapisan lainnya. Dalam aliran laminar, partikel-partikel fluida seolah-olah bergerak sepanjang lintasan-lintasan yang halus dan lancar, dengan satu lapisan meluncur secara mulus pada lapisan yang bersebelahan. Ciri-ciri aliran laminar adalah fluida bergerak mengikuti garis lurus, kecepatan fluidanya rendah, viskositasnya tinggi dan lintasan gerak fluida teratur antara satu dengan yang lain.

Umumnya klasifikasi ini bergantung pada gangguan-gangguan yang dialami suatu aliran yang mempengaruhi gerak partikel-partikel fluida tersebut. Apabila aliran mempunyai kecepatan relatif rendah atau fluidanya sangat *viscous*, gangguan yang mungkin dialami medan aliran akibat getaran, ketidakteraturan permukaan batas dan sebagainya, relatif lebih cepat teredam oleh viskositas fluida disebut aliran laminar. Gangguan yang timbul semakin besar sehingga tercapai kondisi peralihan (*transition state*) pada kecepatan aliran yang bertambah besar atau efek viskositas yang berkurang. Terlampauinya kondisi peralihan menyebabkan sebagian gangguan tersebut menjadi semakin kuat, dimana partikel bergerak fluktuatif atau acak dan terjadi pencampuran gerak partikel antara lapisan-lapisan yang berbatasan. Kondisi aliran yang demikian disebut aliran turbulen.

Kondisi aliran yang laminar dan turbulen ini dapat dinyatakan dengan bilangan Reynolds (*Reynolds number*). Bilangan Reynolds merupakan bilang tidak berdimensi yang merupakan perbandingan antara gaya inersia *body* terhadap gaya geser yang ditimbulkan aliran fluida.

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Geser}}$$

dimana: $Gaya\ Inersia = p \times A = \rho \cdot U^2 \cdot L^2$

$$Gaya\ Geser = \tau \times A = \left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2$$

sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty}^2 \cdot L^2}{\left(\frac{\mu \cdot U_{\infty}}{L} \right) \cdot L^2} = \frac{\rho \cdot U_{\infty} \cdot L}{\mu}$$

dimana:

ρ : Densitas fluida

U_{∞} : Kecepatan aliran *free stream* fluida

L : Panjang karakteristik yang diukur pada medan aliran, dalam kasus ini panjang karakteristik benda uji adalah penampang *needle* yaitu D .

μ : Viskositas dinamis fluida

Sehingga,

$$Re = \frac{\rho \cdot U_{\infty} D}{\mu}$$

Bila $Re < 2300$, maka aliran tersebut tergolong aliran laminar. Apabila $Re=2300$, maka aliran tersebut aliran transisi dan jika $Re > 2300$ maka aliran tersebut adalah aliran turbulen.

2.1.6 Aliran Inkompresibel dan kompresibel

Aliran inkompresibel adalah aliran dimana variasi densitas fluida yang mengalir dapat diabaikan ($\rho = \text{konstan}$). Sedangkan aliran dimana variasi densitas fluida yang mengalir cukup berarti dan tidak dapat diabaikan disebut aliran kompresibel, contohnya adalah gas. Bagi fluida cair, densitas hanya fungsi yang lemah dari suhu. Namun bagaimanapun, efek mampat tekanan tinggi pada fluida cair menjadi penting. Tekanan dan densitas yang berubah pada cairan berkaitan dengan *bulk compressibility modulus* atau modulus elastisitas. Bilangan *Mach* adalah bilangan berdimensi untuk mengkarakteristikan tingkat kompresibilitas aliran. $M < 0.3$ adalah aliran inkompresibel, dimana V adalah kecepatan rata-rata aliran dan c adalah kecepatan suara lokal.

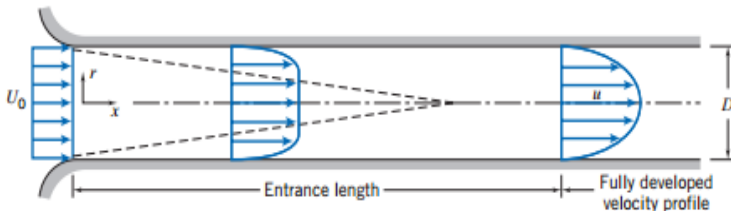
$$M \equiv \frac{V}{c}$$

2.1.7 Aliran Internal dan eksternal

Aliran internal adalah aliran dimana fluida yang mengalir dilingkupi secara penuh oleh suatu batas padat. Sedangkan aliran eksternal adalah aliran yang melingkupi bodi padat. Kedua aliran ini memungkinkan aliran laminar atau turbulen, kompresibel atau inkompresibel. Aliran internal dapat dicontohkan sebagai aliran didalam pipa. *Reynolds number* untuk aliran pipa didefinisikan sebagai $Re = \rho V D / \mu$, dimana V kecepatan rata-rata aliran dan D adalah diameter pipa. Aliran umumnya menjadi laminar jika $Re \leq 2300$ dan turbulen untuk nilai yang lebih besar. Untuk aliran eksternal dapat dicontohkan seperti aliran diatas plat datar. Nilai $Re_x = \rho U_\infty x / \mu$ dimana U_∞ adalah kecepatan sesaat

diluar *boundary layer* dan x adalah panjang karakteristik dari jarak sepanjang plat. Aliran akan laminar jika nilai $Re \leq 5 \times 10^5$ dan turbulen untuk nilai yang lebih besar. Perbedaan nilai Re untuk mengkategorikan aliran laminar atau turbulen menjadikan perhitungan *Reynolds number* sangat penting dan informatif untuk kedua aliran baik aliran internal dan eksternal.

Aliran laminar pada daerah masuk pipa memiliki kecepatan U_0 seragam. *Boundary layer* berkembang sepanjang dinding saluran. Permukaan padat memberikan gaya geser perlambatan pada aliran sehingga kecepatan fluida di sekitar permukaan berkurang. Pada jarak yang cukup jauh dari pintu masuk pipa, *boundary layer* berkembang pada dinding mencapai bagian tengah pipa dan aliran menjadi sepenuhnya *viscous*. Aliran ketika bentuk profil tidak ada lagi perubahan dengan meningkatnya jarak X disebut *fully developed*. Profil aliran pada aliran laminar dalam pipa seperti pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Aliran pada daerah masuk pipa
(Fox dan Mc. Donald, 2011)

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian sebelumnya mengenai irigasi saluran akar dengan berbagai variasi ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

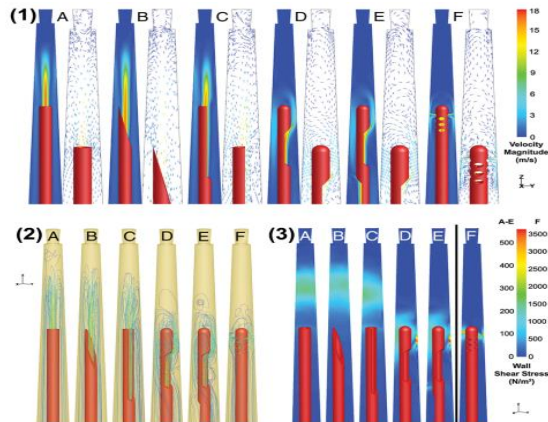
No.	Judul	Penulis	Metodologi	Variasi
1	<i>Evaluation of irrigant flow in the root canal using different needle types by an unsteady computational fluid dynamics model</i>	Boutsioukis dkk (2010)	Simulasi CFD	<ul style="list-style-type: none"> Desain jarum: <i>flat, beveled, notched, side-vented, double side-vented</i> dan <i>multivented</i>
2	<i>The effect of needle-insertion depth on the irrigant flow in the root canal: evaluation using an unsteady computational fluid dynamics model</i>	Boutsoukis dkk. (2010)	Simulasi CFD	<ul style="list-style-type: none"> Variasi posisi WL: 1,2,3,4,5 mm dari apikal Variasi bentuk jarum: <i>open-ended</i> dan <i>side-vented</i>
3	<i>Numerical investigation of root canal irrigation adopting innovative needles with dimple and protrusion</i>	Di Zhang dkk (2013)	Simulasi CFD	<ul style="list-style-type: none"> Desain ujung jarum Debit aliran: 0,02; 0,16 dan 0,26 mL/s
4	<i>Irrigation dynamics associated with positive pressure, apical negative pressure and passive ultrasonic irrigations: A computational fluid dynamics analysis</i>	Chen dkk (2013)	Simulasi CFD	<ul style="list-style-type: none"> Variasi metode: <i>positive pressure (open-ended dan side-vented), negative pressure, dan ultrasonic</i>
5	<i>Irrigant flow within a prepared root canal using various flow rates: a computational fluid dynamics study</i>	Boutsioukis dkk (2009)	Simulasi CFD	<ul style="list-style-type: none"> Variasi debit: 0,02; 0,14; 0,26; 0,53; 0,79 mL/s
6	<i>Root canal irrigation – an engineering analysis using computational fluid dynamics</i>	Tikran Kocharian (2010)	Simulasi CFD	<ul style="list-style-type: none"> Variasi posisi jarum: 2 mm dan 3 mm dari apikal Variasi debit aliran: 0,15 dan 0,30 mL/s

Adapun penjelasan dari penelitian terdahulu sebagai berikut:

2.2.1 Penelitian dengan Variasi Desain Jarum

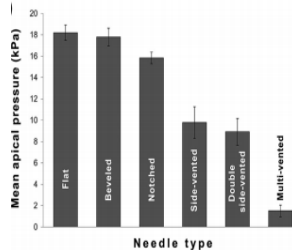
Pada tahun yang sama, **Boutsioukis dkk (2010)** melakukan 2 penelitian sekaligus. Penelitian numerik tersebut mengevaluasi aliran irigan pada saluran akar menggunakan tipe jarum yang berbeda. Dengan pendekatan anatomi saluran akar, dimensi jarum dan fluida irigan yang sama seperti studi sebelumnya, variasi yang digunakan peneliti adalah 6 tipe jarum yang berbeda yaitu jarum *open-ended* (*flat*, *beveled*, *notched*) dan *close-ended* (*side-vented*, *double side vented*, *multivent*). Jarum ditetapkan ditengah dengan panjang kerja 3 mm dari apikal. Hasil simulasi didapat kecepatan jarum *flat* dan *beveled* hampir sama. Pada jarum *notched*, kecepatan jet relatif lebih lambat. Bentuk aliran *close-ended* berbeda jika dibandingkan *open-ended*. Aliran *open-ended* langsung lebih mengarah ke dinding akar yang berada di apikal, sedangkan aliran untuk jarum *side-vented* dan *double side-vented* keluar melalui *outlet* dan mengikuti bentuk lengkung ujung jarum dan membentuk *vortex*.

Untuk jarum *multivent*, kecepatan jet dibentuk melalui pasangan *outlet* yang paling proksimal sebesar 73% dari total aliran. Untuk sepasang kedua dan ketiga hanya sebesar 25% dan 2%. Tiga pasang lainnya menghasilkan kecepatan yang sangat kecil dan tidak berkontribusi untuk aliran keluar. Bentuk tegangan geser pada dinding kanal sama diantara jarum *flat*, *beveled*, dan *notched*. Jarum *side-vented* dan *double side-vented* memiliki tegangan geser yang terkonsentrasi pada dinding yang berhadapan dengan *outlet* sedangkan jarum *multivent* menghasilkan tegangan geser terbesar tetapi terkonsentrasi pada area yang sangat terbatas. Kecepatan dan tegangan geser ditampilkan dengan kontur, vektor dan *pathlines* seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7 berikut.



Gambar 2.7 (1) Kontur kecepatan (kiri) dan vektor (kanan) pada bagian apikal dengan variasi bentuk jarum. (2) *pathlines* dan (3) distribusi tegangan geser (Boutsioukis dkk, 2010)

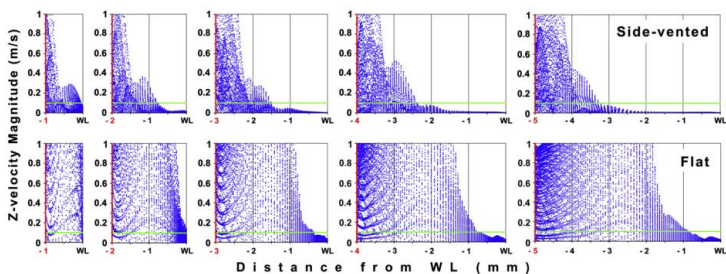
Pertukaran irigan terjadi pada kecepatan $> 0,1$ m/s. Pertukaran irigan yang baik untuk jarum *open-ended* terjauh adalah 2 mm dari ujung jarum, sementara pada jarum *close-ended* terbatas 1 hingga 1,5 mm dari ujung jarum. Tekanan yang berkembang pada ujung apikal saluran kanal pada setiap tipe jarum juga berbeda. Grafik tekanan ditunjukkan pada gambar 2.8



Gambar 2.8 Grafik tekanan irigan pada apikal (Boutsioukis dkk, 2010)

2.2.2 Penelitian dengan Variasi Kedalaman Penyisipan Jarum

Boutsioukis dkk (2010) mengembangkan penelitiannya mengenai endodontik melalui penelitian numerik mengenai efek kedalaman penyisipan jarum pada aliran irigan di saluran akar. Jarum yang digunakan adalah 30-G dengan tipe jarum *open-ended (flat)* dan *side-vented*. Diameter luar jarum 320 μm , diameter dalam jarum 196 μm dan panjang jarum 31 mm. Panjang saluran akar diasumsikan 19 mm dengan diameter apikal sebesar 0,45 mm dan *taper* 6%. Variasi pada simulasi ini adalah kedalaman penyisipan jarum yaitu 1, 2, 3, 4, dan 5 mm dari panjang kerja. Fluida irigan yang digunakan *sodium hypochlorite* (NaOCl) 1% dengan densitas $\rho = 1,04 \text{ g/cm}^3$, viskositas $\mu = 0,99 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ dan dimodelkan sebagai fluida *Newtonian* inkompresibel. *Velocity profile* yang berupa vektor dan kontur dihasilkan pada penelitian ini. Hasil yang didapat adalah bentuk aliran hanya menunjukkan sedikit perbedaan diantara variasi jarak untuk setiap tipe jarum. Perbedaan besar lebih terlihat pada kedua tipe jarum



Gambar 2.9 Distribusi axial z-komponen dari kecepatan irigan terhadap fungsi jarak WL (**Boutsioukis dkk, 2010**)

Jarum *side-vented* hanya memenuhi syarat untuk pertukaran irigan pada jarak 1 sampai 1,5 mm dari apical sedangkan untuk jarum *flat* mengalami pertukaran irigan yang lebih luas yaitu 1 sampai 2 mm dari apikal. Pertukaran irigan terjadi untuk kecepatan diatas 0,1 m/s seperti garis hijau yang ditunjukkan pada grafik kecepatan pada gambar 2.9.

Untuk bentuk tegangan geser pada dinding saluran akar hampir sama untuk variasi posisi pada setiap tipe jarum. Nilai maksimum tegangan geser dinding menurun seiring semakin jauh panjang kerja dari jarum, tetapi areanya semakin luas. Maksimum tegangan geser dinding terkonsentrasi pada *outlet* jarum. Tekanan pada ujung apikal berbeda pada setiap variasi posisi dan tipe jarum. Jarum *flat* memiliki rata-rata tekanan lebih besar dibanding jarum *side-vented*.

2.2.3 Penelitian Numerik Mengenai Desain Ujung jarum

Penelitian Di Zhang (2012) yang meneliti mengenai inovasi bentuk dari jarum *side-vented* juga membahas mengenai *grid independency*. *Grid independency* digunakan untuk meningkatkan akurasi dan validasi model. *Mesh* yang digunakan pada penelitian ini adalah hexahedral dan pada area di dekat dinding memiliki variabel gradien atau lebih rapat. Untuk mengoptimalkan komputasi dan akurasi saat simulasi, *grid independency* dilakukan untuk menentukan jumlah nodes yang digunakan pada analisa komputasi, yang mana rata-rata tekanan pada apikal dipilih untuk sebagai kriteria evaluasi. Seperti ditunjukkan perbedaan relatif atau *error* hanya 0,054% pada mengadopsi 2,12 juta komputasi *node*. Oleh karena itu, yang di usulkan *mesh* adalah kondisi perhitungan 4.

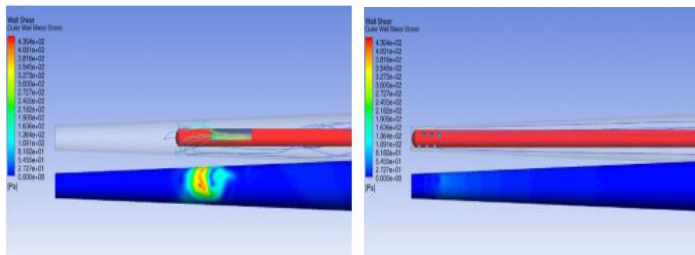
Tabel 2.2 Verifikasi *grid independency* pada domain komputasi

No	Jumlah node / juta	Pavg apikal / kPa	Perbedaan relatif (%)
1	1,2	10,221	—
2	1,86	10,168	0,52
3	2,03	10,156	0,12
4	2,12	10,150	0,054

2.2.4 Penelitian dengan Variasi Metode

Penelitian numerik dan simulasi *CFD* juga dilakukan **Chen dkk (2013)** mengenai karakteristik dinamika irigan dengan jarum yang berbeda dan metode yang berbeda. Metode yang digunakan adalah tekanan positif dengan variasi jarum yang diteliti adalah *open-ended* dan *side-vented*, tekanan negatif dengan sistem *EndoVac®* dan irigasi pasif ultrasonik. Saluran akar sepanjang 18 mm, diameter atas 1,57 mm, diameter apikal 0,45 mm atau *taper* 6,2%. Fluida irigan yang digunakan adalah air suling yang dimodelkan fluida *Newtonian* inkompresibel dengan densitas $\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$, viskositas $\mu = 1,0 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s.}$ metode irigasi dibedakan menjadi 4 grup. Grup 1 adalah jarum 30-G *open-ended* dengan tekanan positif berdiameter 0,196 mm. Grup 2 menggunakan jarum 30-G *side-vented* bertekanan positif dengan dimensi celah $1 \text{ mm} \times 0,24 \text{ mm}$, diposisikan 0,9 mm dari ujung jarum. Grup 3 adalah jarum dengan 12 lubang berdiameter 0,10 mm, diposisikan antara 0,2 sampai 0,7 dari ujung jarum dan bertekanan negatif. Ujung ultrasonik dalam grup 4 dimodelkan sebagai jarum persegi meruncing dengan luas penampang coronal sebagai persegi dengan panjang sisi 0,2 mm dan luas penampang apikal sebagai persegi dengan panjang sisi 0,1 mm.

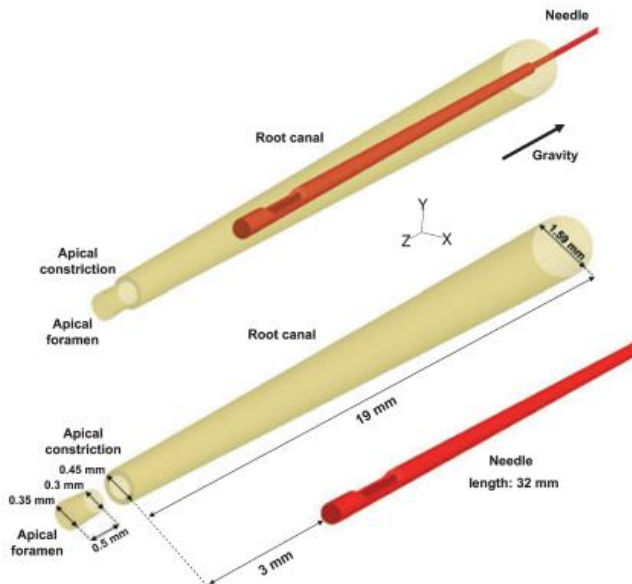
Hasil dari penelitian didapat bentuk aliran irigan yang berbeda dari 4 grup yang diteliti. Grup 1 (jarum dengan *open-ended*) memiliki kecepatan yang besar dengan jarak semprotan terjauh hingga 1,5 mm dari ujung jarum dan intensitas turbulen lebih besar (70%) dibanding grup 2. Kecepatan irigan grup 1 mencapai 7,0 m/s dan tegangan geser dinding 185 Pa. Grup 2 (jarum *side-vented*) memiliki kecepatan yang lambat sebesar 1,0 m/s dan intensitas turbulen lebih kecil (<10%) dari grup 1 dan 4. Tegangan geser dinding sebesar 425 Pa. Grup 3 (tekanan negatif) menghasilkan kecepatan konstan dan bentuk aliran yang seragam dan laminar. Ujung jarum diletakkan 0,01 mm dari ujung apikal. Grup 3 menghasilkan tegangan geser sebesar 45 Pa dan yang paling kecil dibanding 3 grup lainnya. Grup 4 (irigasi pasif dengan bantuan ultrasonik) menunjukkan kecepatan yang konstan hampir disekeliling kanal dan terbesar diantara semua metode. Dengan frekuensi 30 kHz dan amplitudo 70 μm , nilai tegangan geser mencapai 875 Pa dengan intensitas turbulensi (>96%) terbesar. Diamati bahwa pergerakan fluida irigasi itu kurang terorganisir dan menunjukkan aliran berosilasi saat bergerak koronal. Profil tegangan geser yang disimulasikan ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Distribusi tegangan geser pada jarum *side-vented* tekanan positif (kiri) dan jarum tekanan negatif (kanan) (Chen dkk, 2013)

2.2.5 Penelitian dengan Variasi Debit

Boutsioukis dkk (2009) melakukan penelitian numerik tentang pengaruh variasi laju aliran atau debit pada saluran akar terhadap bentuk aliran. Jarum yang digunakan pada penelitian ini adalah jarum *side-vented* 30-G berdiameter 0,45 mm dan panjang 32 mm. Jarum diposisikan 3 mm dari ujung apikal. Saluran akar memiliki panjang 19 mm, diameter atas 1,59 mm dan 0,45 mm pada bagian apikal. Bagian apikal foramen dibuat sepanjang 0,5 mm. Fluida irigan yang digunakan adalah *sodium hypochlorite* 1 % yang dimodelkan sebagai fluida *Newtonian* inkompresibel dengan densitas $\rho = 1,04 \text{ g/cm}^3$ dan viskositas $\mu = 0,986 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Model uji yang digunakan diilustrasikan seperti pada gambar 2.11



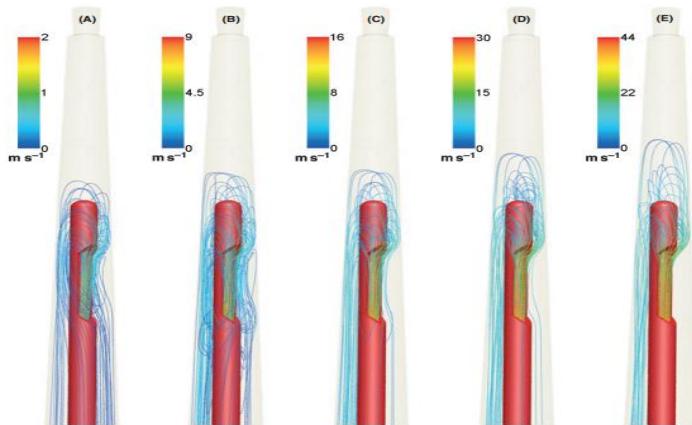
Gambar 2.11 Model uji saluran akar dan jarum
(Boutsioukis dkk, 2009)

Variasi yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 2.3

Tabel 2.3 Kondisi *inlet* untuk 5 kasus
(Boutsoukias *et al*, 2009)

Case	Inlet velocity (m sec ⁻¹)	Irrigant flow rate (mL sec ⁻¹)	Reynolds number at the needle inlet
A	1	0.02	177
B	6	0.14	1063
C	12	0.26	2126
D	24	0.53	4253
E	36	0.79	6379

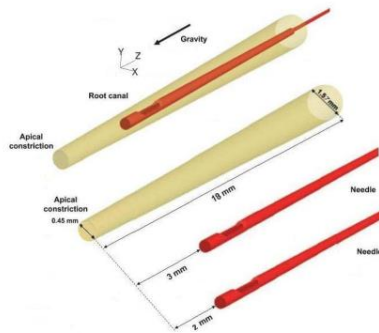
Hasil dari penelitian didapat bahwa efek variasi *inlet* jarum sangat signifikan dalam menentukan medan aliran didalam kanal. Kecepatan maksimum irigan dalam akar diamati sekitar *outlet* jarum. Besarnya kecepatan meningkat seiring kenaikan kecepatan *inlet* seperti yang diharapkan. Irigasi dalam bagian distal menunjukkan perilaku stagnan hampir pada setiap kasus. Jet irigan dibentuk pada daerah *outlet* dan diarahkan menuju apikal dengan perbedaan sudut sekitar 30 derajat. Larutan irigan yang keluar menyebar sekitar jarum kemudian mengikuti bentuk melengkung pada ujung jarum dan naik menuju lubang kanal. Peningkatan kecepatan *inlet* menyebabkan penggantian irigan yang lebih efisien. Namun, efek ini hanya terbatas pada jarak 1-1,5 mm dari ujung jarum bahkan dengan kecepatan maksimum pada kasus E dan tidak mencapai ujung foramen apikal. Profil kecepatan dari penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.12



Gambar 2.12 *streamlines* berdasarkan *velocity magnitude* (Boutsioukis dkk, 2009)

2.2.6 Penelitian dengan Variasi Panjang Kerja dan Debit

Kocharian (2010) melakukan penelitian tentang distribusi kecepatan dari aliran irigan, tekanan pada dinding, dan tegangan geser dinding pada saluran akar berbasis *CFD*. Anatomi saluran akar dibuat sepanjang 18 mm dengan diameter 1,57 mm pada lubang kanal dan 0,45 mm pada titik apikal (*taper* 6,2%). Jarum yang digunakan adalah jarum 30-G *side-vented* dengan dimensi $D_{ext} = 320\mu\text{m}$, $D_{int} = 196\mu\text{m}$ dan panjang 31 mm. Fluida irigan yang digunakan adalah air suling yang dimodelkan fluida *Newtonian* inkompresibel dengan densitas $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ dan viskositas $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$. Variasi pada penelitian ini ada 2 yaitu variasi posisi jarum dan variasi laju aliran atau debit. Variasi posisi ditentukan 2 mm dan 3 mm dari apikal. Variasi debit ditentukan 0,15 dan 0,3 mL/s. Model uji diilustrasikan seperti pada gambar 2.13



Gambar 2.13 Model uji saluran akar dan jarum
(Kocharian, 2010)

Hasil simulasi ditunjukkan dalam tabel 2.4

Tabel 2.4 Hasil simulasi (Kocharian, 2010)

	Irrigant flow (mL/sec)	Dynamic Pressure (Pa)	Wall Shear Stress (Pa)	Max. Velocity Magnitude (m/s)
(i) RFRD	0.15	104.30	17	0.48
(ii) DFRD	0.30	424.28	45	0.92
(iii) RFINS	0.15	188.44	26	0.61
(iv) DFINS	0.30	786.07	70	1.30

Keterangan:

RFRD (Regular Flow, Regular Depth) – Debit diatur 0,15 ml/sec dan panjang kerja 3 mm

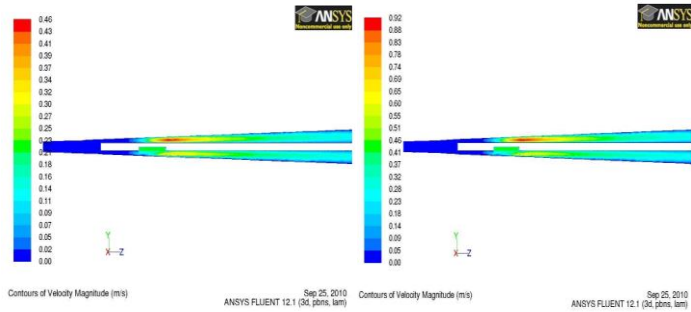
DFRD (Double Flow, Regular Depth) – Debit diatur 0,30 ml/sec dan panjang kerja 3 mm

RFINS (Regular Flow, Inserted Depth) – Debit diatur 0,15 ml/sec dan panjang kerja 2 mm

DFINS (Double Flow, Inserted Depth) – Debit diatur 0,30 ml/sec dan panjang kerja 2 mm

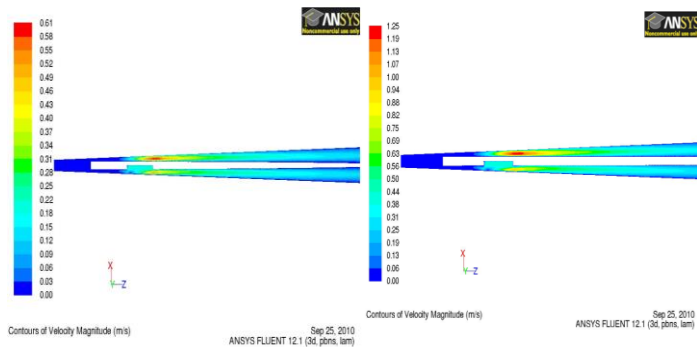
Peneliti menyimpulkan bahwa memvariasikan debit dan posisi penyisipan jarum tidak mengubah pola aliran. Perubahan debit irigasi dan kedalaman jarum hanya mempengaruhi besarnya kecepatan aliran, tegangan geser dinding, dan tekanan dinamis. Kelemahan tegangan geser dinding dari ujung saluran akar hingga ujung jarum irigasi menjadi kendala dalam mengefektifkan pembersihan debris

pada sepertiga apikal. Hasil simulasi digambarkan dalam bentuk kontur pada setiap variasi seperti pada gambar 2.14.



(a)

(b)



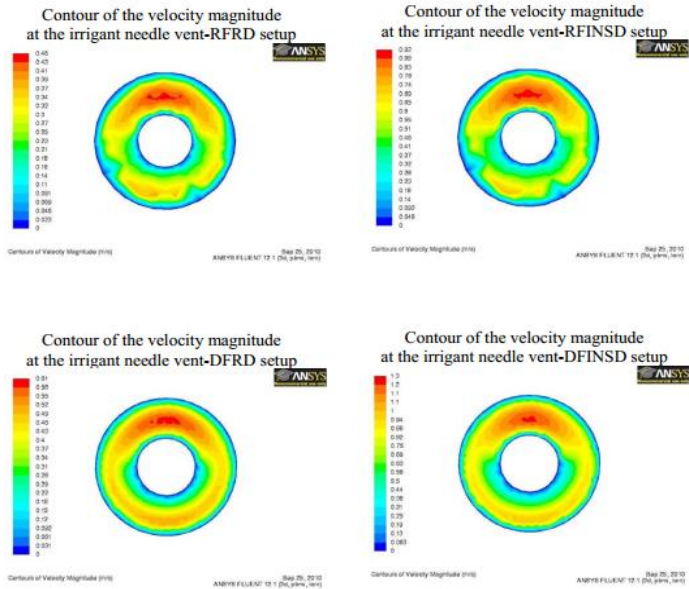
(c)

(d)

Gambar 2.14 Kontur kecepatan dengan pengaturan
(a) RFRD, (b) DFRD, (c) RFINS dan (d) DFINS
(Kocharian, 2010)

Peneliti juga menggambarkan kontur kecepatan dengan membagi saluran kanal menjadi 12 bagian. Perbandingan kontur kecepatan setiap variasi ditunjukkan

pada gambar 2.15, dimana diambil pada posisi bagian ke 6 atau sejauh kurang lebih 6 mm dari apikal saluran akar.



Gambar 2.15 Perbandingan kontur kecepatan pada *section* 6 setiap pengaturan (Kocharian, 2010)

BAB III

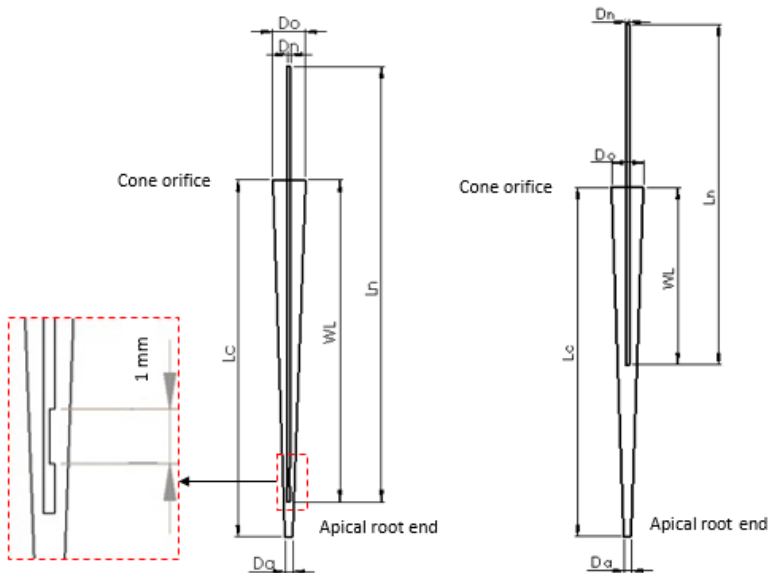
METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan metode penelitian aliran pada perawatan saluran akar dengan tekanan positif (jarum *side-vented*) dan tekanan negatif secara numerik. Studi numerik ini menggunakan metode piranti lunak simulasi *CFD* komersial untuk menggambarkan geometri. Simulasi numerik dilakukan untuk menganalisa karakteristik aliran dalam saluran akar gigi dengan variasi bentuk jarum yaitu *side-vented* dan *open-ended* dan variasi metode yaitu tekanan positif dan tekanan negatif. Berikut metodologi pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi literatur
Studi literatur dilakukan untuk mencari serta mempelajari beberapa literatur yang terkait dengan tema penelitian, seperti mengumpulkan informasi berupa artikel ilmiah, jurnal, buku teks serta hasil penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya.
2. Simulasi
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui adanya fenomena aliran tiga dimensi (*3D*) pada saluran akar sesudah diinjeksikan oleh jarum dengan 2 metode, yaitu tekanan positif dan tekanan negatif. Pada tahap ini langkah-langkah yang dilakukan yaitu *pre-processing*, *processing* dan *post-processing* dengan perangkat lunak metode komputasi fluida komersial.
3. Penyusunan laporan
Laporan ini tersusun atas pendahuluan, tinjauan pustaka, metodologi penelitian, analisa dan pembahasan serta kesimpulan dan saran

3.1 Geometri Benda Uji

Penelitian secara numerik ini melakukan simulasi aliran pada saluran akar gigi yang berbentuk seperti *cone* atau disebut *frustum* dan jarum yang digambarkan dengan bentuk silinder. Jarum yang digunakan berbentuk *side-vented* dengan tekanan positif dan jarum *open-ended* dengan tekanan negatif yang disisipkan kedalam saluran akar. Debit aliran sebesar 0,2 mL/s. Referensi 0 mm berada pada bagian apikal. Ilustrasi domain permodelan dapat ditunjukkan pada gambar 3.1 sebagai berikut:



Gambar 3.1 Permodelan saluran akar dengan jarum *side-vented* tekanan positif (kiri) dan jarum *open-ended* tekanan negatif (kanan)

Saluran akar yang disimulasikan untuk tekanan positif adalah saluran akar dengan panjang 20,5 mm, 20,9 mm dan 22,5 mm sedangkan untuk tekanan negatif adalah saluran akar dengan panjang 20,5 mm dan 22,5 mm.

Spesifikasi dari metode tekanan positif adalah sebagai berikut:

- Bentuk jarum : silinder dengan *side-vented*
- Diameter jarum (Dn) : 0,196 mm
- Panjang jarum (Ln) : 25 mm
- Luas celah *side-vented* : $1 \text{ mm} \times 0,196 \text{ mm} \times 0,098 \text{ mm}$
- Kedalaman penyisipan (WL) : 2 mm dari apikal
- Diameter orifis (Do) : 1,88 mm, 1,91 mm dan 1,95 mm
- Panjang saluran akar (Lc) : 20,5 mm, 20,9 mm dan 21,5 mm
- Diameter apikal (Da) : 0,45 mm (7% *taper*)

Spesifikasi dari metode tekanan negatif adalah sebagai berikut:

- Bentuk jarum : silinder dengan *open-ended*
- Diameter jarum (Dn) : 0,196 mm
- Panjang jarum (Ln) : 20 mm
- Kedalaman penyisipan (WL) : 10 mm dari *cone* orifis
- Tekanan hisap : -20 kPa
- Diameter orifis (Do) : 1,88 mm dan 2,02 mm
- Panjang saluran akar (Lc) : 20,5 mm dan 22,5 mm
- Diameter apikal (Da) : 0,45 mm (7% *taper*)

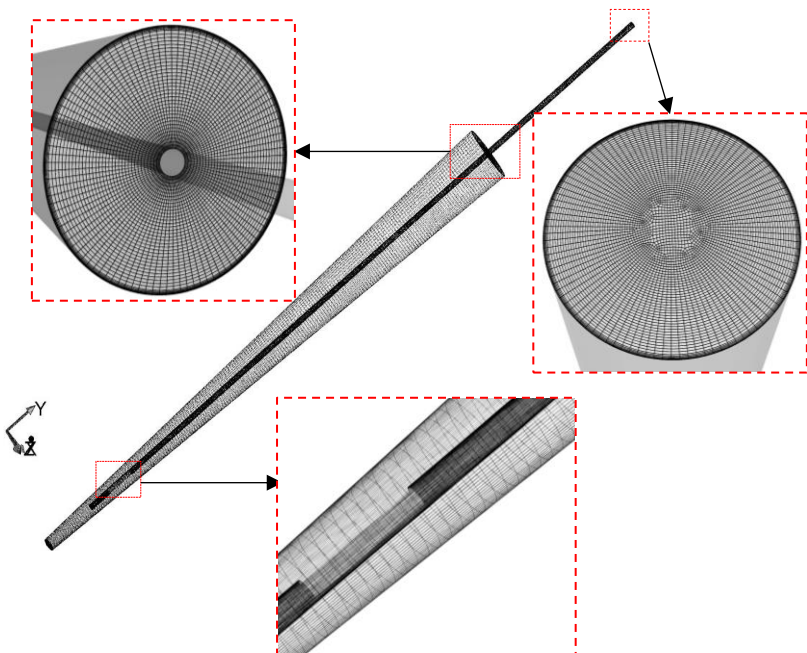
3.2 Metode Numerik

Penelitian ini menggunakan piranti lunak komputasi fluida (CFD) komersial untuk melakukan pendekatan numerik dan membuat geometri model serta melakukan diskritisasi (*meshing*) pada model. Secara umum, urutan kerja yang dilakukan pada penelitian numerik dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap *pre-processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

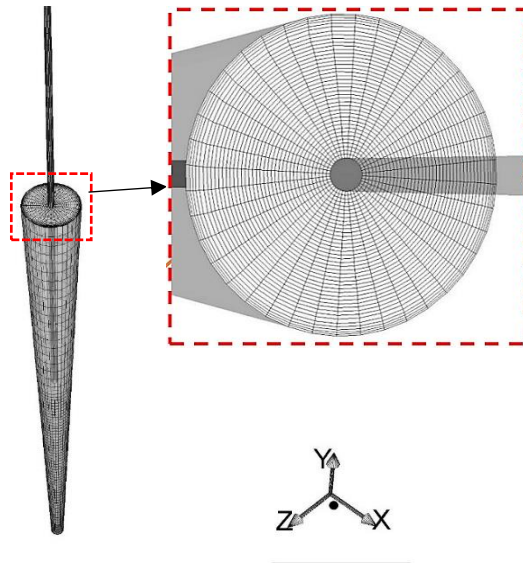
3.2.1 Tahap *pre-processing*

- a) Pembuatan model 3D *cone* dan *needle* mengacu pada geometri gambar 3.1 sesuai spesifikasi dengan variasi tekanan positif dan negatif. Pembuatan geometri dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak metode komputasi fluida komersial.

- b) Pembuatan *meshing* dilakukan untuk setiap variasi bentuk jarum yang bertekanan positif dan bertekanan negatif. *Meshing* dilakukan dengan membagi menjadi 2 bagian, yaitu *meshing* untuk *cone* dan *needle*. Pada metode tekanan positif, *cone* dibagi menjadi 4 bagian dan *needle* dibagi menjadi 3 bagian. Sementara untuk metode tekanan negatif, *cone* dibagi menjadi 2 bagian dan *needle* dibagi menjadi 2 bagian. *Meshing volume* yang digunakan dengan tipe *hexahedral-map*. *Meshing* pada sisi dinding *cone* dan *needle* dibuat semakin rapat. *Meshing* pada metode tekanan positif dan tekanan negatif ditunjukkan pada gambar 3.2 dan 3.3.

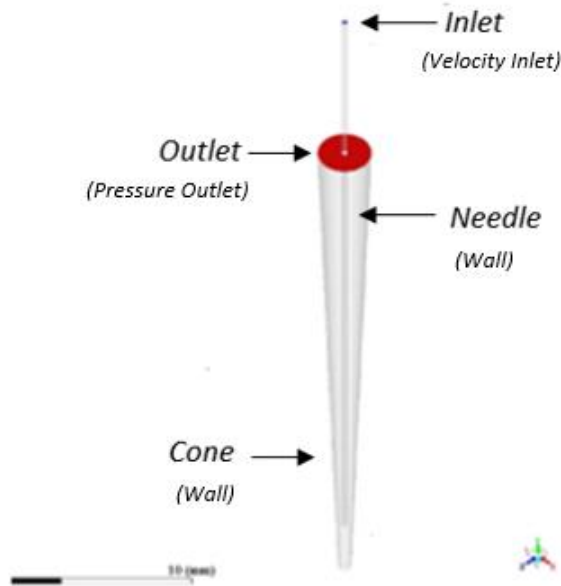


Gambar 3.2 *Meshing* metode tekanan positif



Gambar 3.3 Meshing metode tekanan negatif

- c) Tahapan selanjutnya adalah pembuatan *boundary condition* untuk dapat diproses pada proses selanjutnya. Tahapan ini adalah tahapan untuk mendefinisikan fluida masuk (*inlet*), keluar (*outlet*), serta dinding yang membatasinya (*wall*). Pendefinisian ini dengan *inlet* pada ujung atas *needle*, *outlet* pada bagian *cone orifice* atau atas gigi, serta untuk *wall* pada bagian yang menyelimuti *cone* dan *needle*. *Boundary condition* yang digunakan untuk setiap metode adalah sama. Bagian fluida masuk pada ujung atas jarum atau *inlet* diatur sebagai *velocity inlet*, sedangkan bagian *cone orifice* diatur sebagai *pressure outlet*, dimana pada tekanan positif ditetapkan tekanan atmosfer dan pada tekanan negatif dimasukkan nilai -20 kPa sebagai tekanan hisap. *Boundary condition* diilustrasikan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Kondisi batas

3.2.2 Tahap *post-processing*

Pada tahap *post-processing* adalah tahapan proses simulasinya. Simulasi ini harus mengatur parameter yang digunakan. Parameter yang digunakan pada penelitian meliputi:

a) *Grid*

Langkah pertama yang dilakukan adalah *read* untuk *file* hasil *meshing* berbentuk *.msh* kemudian *grid checking* untuk melihat apakah *grid* pada *meshing* tersebut sudah bagus untuk dilakukan *post-processing*. Apabila tidak sesuai maka akan muncul tulisan *error*. Setelah itu skala ditentukan dalam satuan milimeter (mm).

b) *Models*

Pada langkah ini dilakukan pemodelan karakteristik aliran, meliputi pemilihan model *solver pressure based, steady* dan menggunakan model *laminar*

c) *Materials*

Data *properties* material fluida yaitu NaOCl 2,5% dengan densitas (ρ) 1060 kg/m^3 dan *viskositas absolute* (μ) $1,073 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$.

d) *Operating conditions*

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ (*pascal*).

e) *Cell zone*

Menentukan fluida yang digunakan pada penelitian ini serta mendefinisikan bahwa berbentuk *cone* dengan *taper* 7% atau kemiringan hanya 2° .

f) *Boundary conditions*

Mendefinisikan parameter-parameter dan batasan yang telah dibuat seperti *inlet*, *outlet*, serta *wall*. Pada *inlet* didefinisikan sebagai *velocity inlet* dalam (m/s) dimana nilai *velocity* yang *diinputkan* yaitu $6,63 \text{ m/s}$ untuk metode tekanan positif dan metode tekanan negatif, pada *wall* diset faktor kekasaran dibuat *default* dan *no slip*. Daerah *outlet* didefinisikan sebagai *pressure outlet* dimana pada metode tekanan positif diatur 0 dan metode tekanan negatif diatur sebesar -20 kPa atau tekanan vakum.

g) *Solution*

Solution pada penelitian ini akan menggunakan metode *SIMPLE* serta *discretization second order* untuk *pressure*, *second-order upwind* untuk momentum

h) *Initialize*

Merupakan langkah awal untuk proses iterasi agar mudah mencapai *convergen*, langkah ini dapat dihitung dari *inlet*, *outlet*, atau daerah lainnya. Dalam kasus ini langkah awal dimulai dari sisi *inlet*.

i) *Monitor residual*

Pada proses iterasi berlangsung harga kriteria konvergensi yang ditentukan agar proses iterasi tidak berlangsung terlalu lama. Kriteria konvergensi ditetapkan sebesar 10^{-4} untuk *continuity*, *x-velocity*, *y-velocity*, *z-velocity*, *k* dan ϵ . Proses iterasi dinyatakan telah *convergen* setelah residualnya mencapai nilai lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan serta ditentukan juga plot proses iterasi.

j) *Iterate*

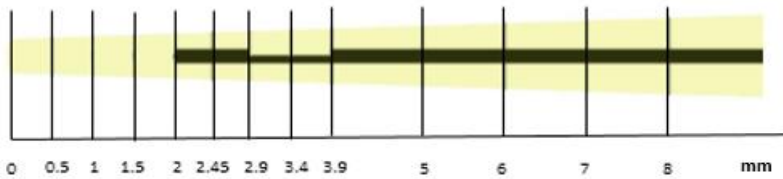
Langkah selanjutnya setelah penetapan harga *monitor residual* adalah *iterate*, yang merupakan langkah perhitungan pada piranti lunak simulasi *CFD* komersial. *Iterate* akan secara otomatis berhenti apabila semua nilai residualnya mencapai nilai lebih kecil dari nilai yang telah ditentukan dan dapat dikatakan iterasi sudah *convergen*. Apabila tidak tercapai kriteria *convergen* maka dilakukan tahapan untuk memperbaiki pembuatan *meshing*.

k) *Post-processing*

Merupakan penampilan hasil setelah dilakukan iterasi. Hasil tersebut berupa data kuantitatif dan kualitatif. Data kuantitatif berupa distribusi nilai kecepatan, tegangan geser, dan lain sebagainya. Data kualitatif berupa penampilan *velocity profile* pada setiap *cross section* dan penampilan kontur kecepatan. Posisi pengambilan data pada metode tekanan positif ditabelkan pada tabel 3.1 dan ditunjukkan pada gambar 3.5.

Tabel 3.1 Posisi pengambilan data pada metode tekanan positif

No.	Variasi panjang kerja saluran akar	Posisi pengambilan data
1	20,5 mm	<ul style="list-style-type: none"> • 0 mm (apikal) hingga 2 mm (posisi ujung jarum) dengan rentang 0,5 mm • 2 mm hingga 2,9 mm dengan rentang 0,45 mm • 2,9 mm hingga 3,9 mm dengan rentang 0,5 mm • 3,9 mm hingga 8 mm dengan rentang ± 1 mm
2	20,9 mm	<ul style="list-style-type: none"> • 0 mm (apikal) hingga 2 mm (posisi ujung jarum) dengan rentang 0,5 mm • 2 mm hingga 2,9 mm dengan rentang 0,45 mm • 2,9 mm hingga 3,9 mm dengan rentang 0,5 mm • 3,9 mm hingga 8 mm dengan rentang ± 1 mm
3	21,5 mm	<ul style="list-style-type: none"> • 0 mm (apikal) hingga 2 mm (posisi ujung jarum) dengan rentang 0,5 mm • 2 mm hingga 2,9 mm dengan rentang 0,45 mm • 2,9 mm hingga 3,9 mm dengan rentang 0,5 mm • 3,9 mm hingga 8 mm dengan rentang ± 1 mm

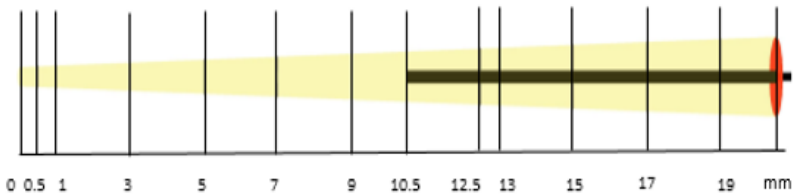


Gambar 3.5 Posisi pengambilan data metode tekanan positif jarum *side-vented*

Posisi pengambilan data pada metode tekanan negatif ditabelkan pada tabel 3.2 dan ditunjukkan pada gambar 3.6.

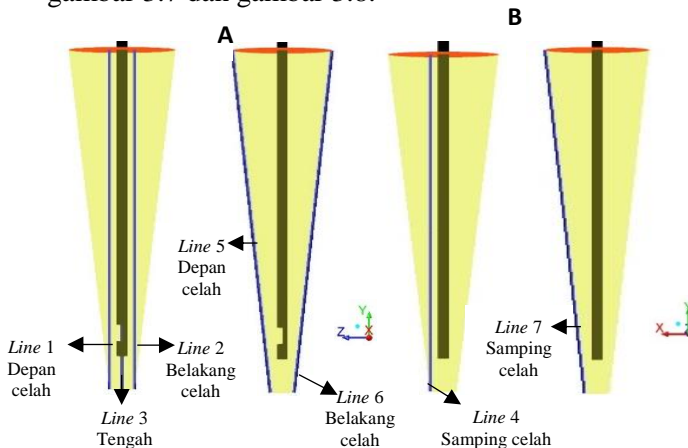
Tabel 3.2 Posisi pengambilan data pada metode tekanan negatif

No.	Variasi panjang kerja saluran akar	Posisi pengambilan data
1	20,5 mm	<ul style="list-style-type: none">• Posisi 0,5 mm dari apikal• Posisi 1 mm hingga 9 mm dan 13 mm hingga 19 mm dengan rentang 2 mm• Posisi 10,5 dan 12,5mm
2	22,5 mm	<ul style="list-style-type: none">• Posisi 0,5 mm dari apikal• Posisi 1 mm hingga 9 mm dan 13 mm hingga 19 mm dengan rentang 2 mm• Posisi 10,5 dan 12,5mm

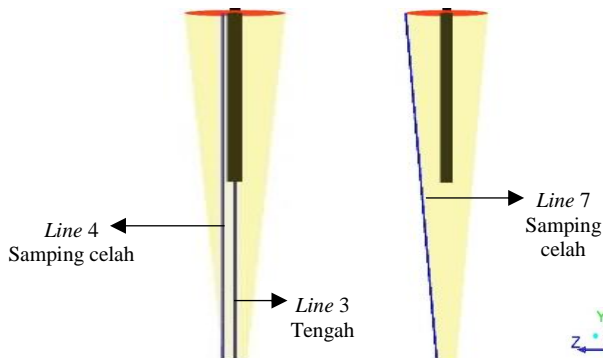


Gambar 3.6 Posisi pengambilan data metode tekanan negatif jarum *open-ended*

Selain itu untuk memperjelas data kualitatif atau kontur kecepatan, tegangan geser dan tekanan dinamis diperlukan data kuantitatif. Data kuantitatif dipresentasikan dalam bentuk grafik. Pengambilan data menggunakan fitur *line/rake*. Pengambilan data ini dilakukan pada kedua metode. Pada metode tekanan positif jarum *side-vented*, *line* diambil pada 4 posisi untuk mengambil data kecepatan dan tekanan dinamis, yaitu pada bagian depan celah, belakang, samping jarum dan bagian tengah *cone*. Untuk mengambil data *wall shear stress* diambil 3 posisi pada dinding saluran akar yaitu dinding bagian depan celah, dinding bagian belakang dan dinding bagian samping. Pada tekanan positif, data tegangan geser diambil pada dinding sepanjang saluran akar, sedangkan untuk kecepatan dan tekanan dinamis diambil pada 2 posisi yaitu posisi tengah setelah keluar jarum hingga dasar apikal saluran akar dan dari apikal saluran akar hingga *outlet* saluran akar. Adapun posisi pengambilan datanya ditunjukkan dengan garis biru pada gambar 3.7 dan gambar 3.8.

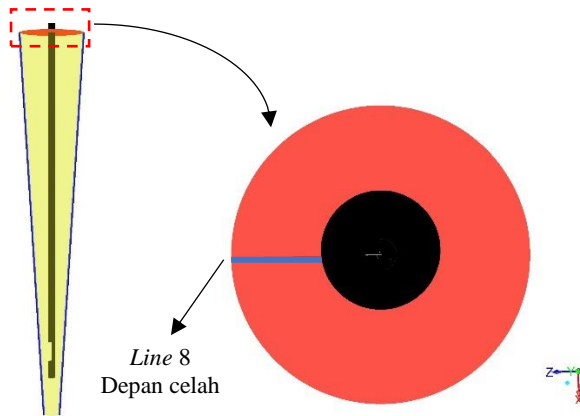


Gambar 3.7 Posisi pengambilan data *line/rake* tekanan positif (a) sumbu $x=0$ dan (b) sumbu $y=0$



Gambar 3.8 Posisi pengambilan data *line/rake* tekanan negatif sumbu $x=0$

Line 1 dan *2* digunakan untuk mengambil data kuantitatif kecepatan dan tekanan dinamis pada metode tekanan positif sedangkan *line 3* untuk mengambil data pada bagian tengah dari ujung jarum hingga apikal. *Line 4* digunakan untuk mengambil data pada posisi samping celah jarum untuk Tekanan positif seperti ditunjukkan pada gambar 3.11 pada potongan $y=0$. *Line 5, 6* dan *7* digunakan untuk mengambil data kuantitatif *wall shear stress* pada bagian depan celah, belakang celah dan samping celah untuk tekanan positif serta pada bagian dinding disamping jarum untuk tekanan negatif. Pada bagian *outlet* juga diteliti kecepatannya agar dapat melihat efektifitas pertukaran irigan di posisi tersebut. Pengambilan data untuk perbandingan kedua metode dilakukan dengan membuat *line/rake* pada bagian *outlet* saluran akar yang sejajar pada bagian depan celah dan pada tekanan negatif ditempatkan sepanjang samping jarum. Gambar 3.9 memperjelas posisi pengambilan data untuk data kecepatan pada bagian *outlet* yang ditunjukkan pada garis biru.



Gambar 3.9 Posisi pengambilan data kecepatan pada *outlet cone*

3.3 Langkah penelitian

Langkah-langkah penelitian numerik pada pembersihan saluran akar gigi ini adalah:

1. Melakukan pembuatan geometri dari *cone* dan *needle*
2. Memodelkan *cone* dan *needle*.
3. Membuat *meshing* dengan metode pembuatan *meshing* berupa *grading mesh* menggunakan tipe *hexahedral-map*
4. Menentukan *boundary condition* pada model uji dan batasan yang digunakan dalam penyelesaian simulasi seperti *inlet*, *outlet*, dan *wall*
5. Menentukan batas operasi dalam simulasi model uji meliputi: *models*, *materials*, *boundary condition*, *solution*, *initialize*, *monitor residual*, dan *iterate*
6. Melakukan iterasi hingga mencapai konvergensi yang ditentukan pada residual. Bila simulasi belum konvergen maka pembuatan *mesh* pada model uji diulangi lagi.

7. Setelah didapatkan hasil konvergen maka selanjutnya dilakukan analisa *grid independency*. Analisa *grid independency* divariasikan sebanyak 4 variasi jumlah *mesh* untuk setiap metode.
8. Melakukan simulasi pada model uji dengan variasi yang ditentukan
9. Melakukan *post-processing* tiap variasi
10. Analisa hasil dan penarikan kesimpulan

3.4 Analisa Grid Independency

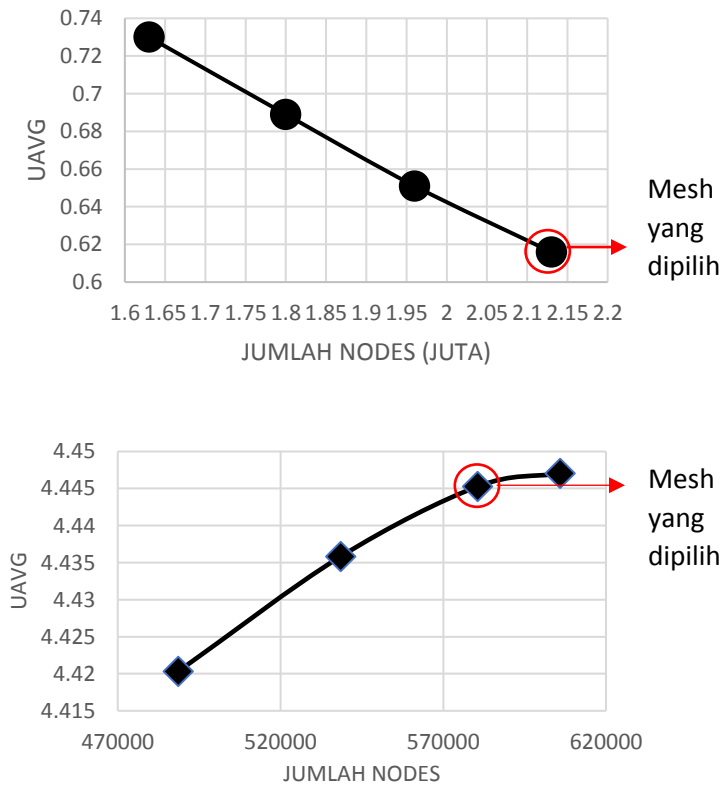
Meshing hexahedral dihasilkan dan disempurnakan pada bagian di dekat dinding dan di area dimana gradien tinggi diantisipasi untuk meningkatkan keakuratan dan validitas model. Menyeimbangkan keakuratan simulasi dan sumber komputasi, sebuah cek *grid independency* dilakukan untuk menentukan kelayakan *grid nodes* untuk analisis komputasi dimana rata-rata kecepatan dipilih sebagai kriteria evaluasi. Data acuan diambil pada posisi $y=2$ mm dari apikal untuk tekanan positif dan $y=1$ mm untuk tekanan negatif. Variasi *mesh* dibuat dengan empat kerapatan dan jumlah *nodes* yang berbeda-beda. *Grid independency* dilakukan dua kali pada kedua variasi metode. Pada tabel 3.3 dilakukan verifikasi *grid independency* untuk tekanan positif dan pada tabel 3.4 untuk tekanan negatif. Dari hasil *grid independency* yang telah dilakukan, diperoleh variasi kerapatan *mesh* yang memiliki *error* terkecil pada tekanan positif yaitu pada variasi *mesh* 4 dengan jumlah *mesh nodes* sebesar 2,13 juta *nodes* sehingga dipilih *mesh* 4, meskipun gambar 3.10 menunjukkan bahwa *trendline* masih belum independen namun telah mencapai jumlah *nodes* maksimal. Pada tekanan negatif dipilih variasi *mesh* 3 karena memiliki perbedaan paling kecil dan *trendline* mulai cenderung mendatar.

Tabel 3.3 Verifikasi *grid independency* tekanan positif pada domain komputasi pada $y = 2$ mm dari apikal

<i>Calculation conditions</i>	<i>Number of Nodes</i>	<i>Mean Velocity (m/s)</i>	<i>Relative discrepancy (%)</i>
1	1,63 juta	0,730	-
2	1,8 juta	0,689	5,62
3	1,96 juta	0,651	5,52
4	2,13 juta	0,616	5,37

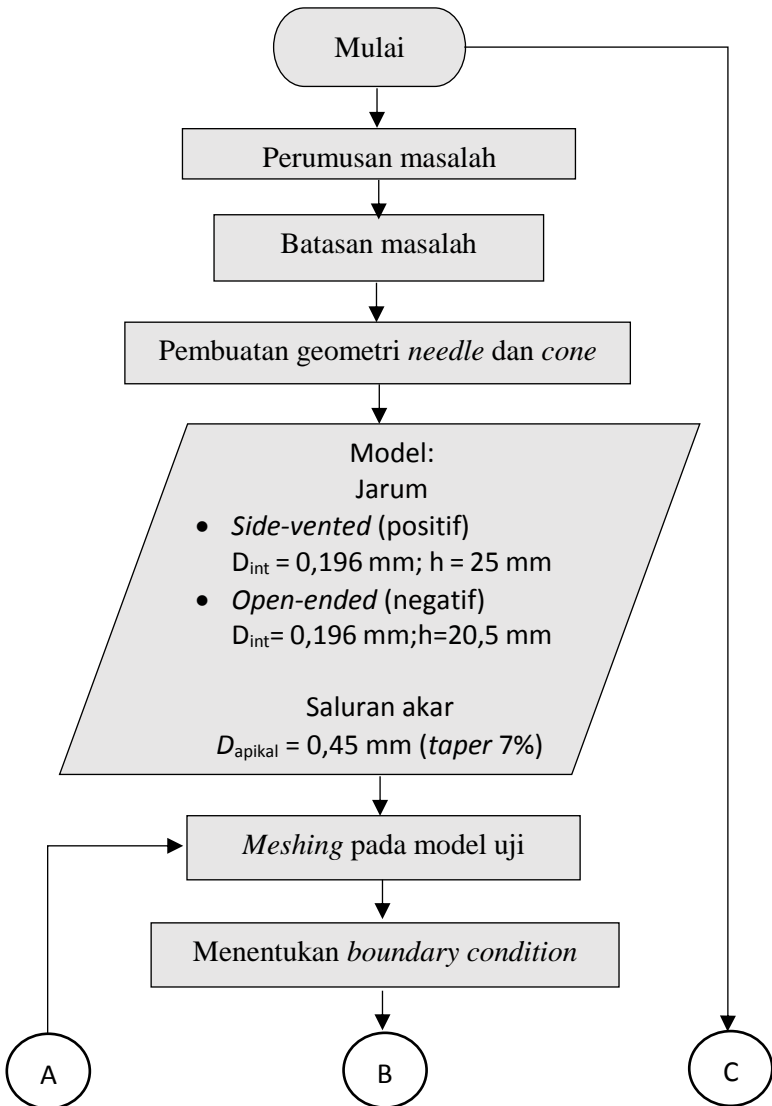
Tabel 3.4 Verifikasi *grid independency* tekanan negatif pada domain komputasi pada $y = 1$ mm dari apikal

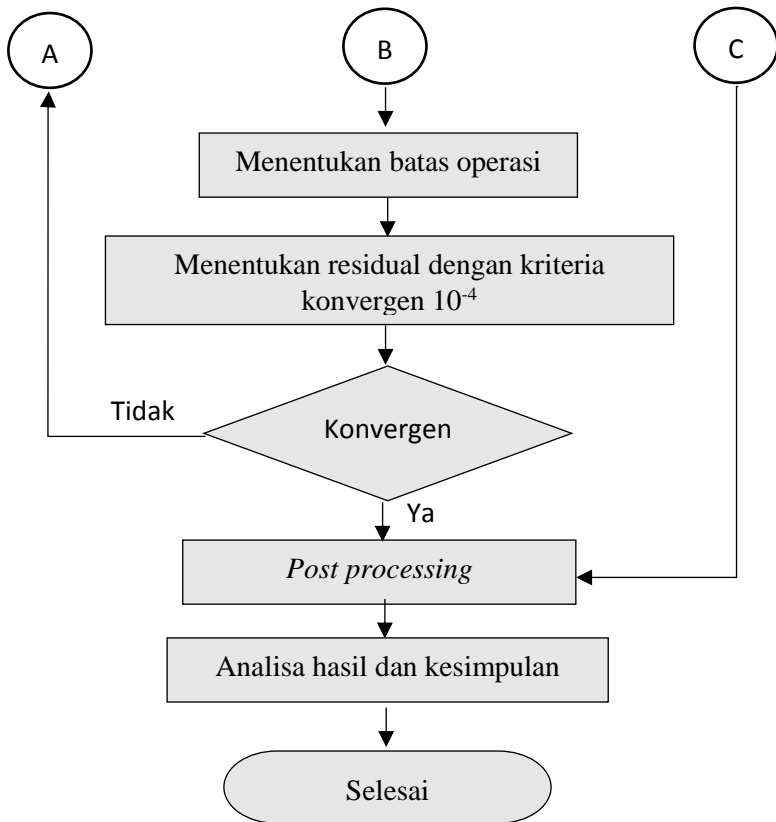
<i>Calculation conditions</i>	<i>Number of Nodes</i>	<i>Mean Velocity (m/s)</i>	<i>Relative discrepancy (%)</i>
1	489 ribu	4,42	-
2	538 ribu	4,435	0,349
3	581 ribu	4,445	0,212
4	606 ribu	4,447	0,039



Gambar 3.10 Grafik *grid independency* tekanan positif (atas) dan tekanan negatif (bawah)

3.5 Flowchart Penelitian





Gambar 3.11 *Flowchart* penelitian

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab hasil dan pembahasan ini menampilkan data hasil studi numerik secara kuantitatif dan kualitatif untuk kedua metode negatif dengan variasi panjang saluran akar serta membandingkan efektifitas pertukaran irigan kedua metode. Hasil numerik secara kualitatif ditampilkan berupa visualisasi aliran pada saluran akar seperti profil kecepatan, *pathlines*, kontur, dan vektor kecepatan, kontur *wall shear stress*, kontur *pressure* dan kontur pada *surface cross-section* yang telah ditentukan. Hasil numerik secara kuantitatif ditampilkan berupa data grafik profil kecepatan terhadap posisi panjang kerja, grafik *wall shear stress* dan grafik *pressure* serta jarak terjauh pertukaran irigan. Visualisasi ini bertujuan untuk memperjelas hasil yang didapatkan dari data kuantitatif, yaitu berupa kecepatan, tegangan geser, dan tekanan yang ditinjau pada kontur, vektor, dan *pathlines*. Visualisasi ini dilakukan dengan bantuan piranti lunak *CFD* komersial.

Hasil dan pembahasan studi numerik ini dilakukan pada irigasi saluran akar dengan dua metode yang berbeda yaitu metode tekanan positif menggunakan jarum *side-vented* dan metode tekanan negatif jarum *open-ended* dengan variasi panjang kerja atau panjang saluran akar gigi pada setiap metode. Variasi panjang saluran akar untuk metode irigasi tekanan positif yaitu 20,5 mm, 20,9 mm dan 21,5 mm dengan kedalaman penyisipan ditetapkan 2 mm dari ujung apikal. Variasi panjang saluran akar untuk metode irigasi tekanan negatif 20,5 mm dan 22,5 mm dengan kedalaman penyisipan jarum sejauh 10 mm dari *cone orifice*. Hasil simulasi numerik untuk panjang saluran akar 20,5 mm untuk metode positif dan metode negatif dibandingkan untuk mengevaluasi efektifitas pembersihan yang optimal melalui visualisasi pola aliran, kontur kecepatan, *pathlines* kecepatan, kontur *wall shear stress*, kontur *surface cross-section* dan kontur tekanan serta dengan grafik. Hasil numerik secara kuantitatif dan kualitatif seperti profil kecepatan pada setiap *cross-section*, kontur dan *pathlines* pada irigasi saluran

akar disajikan dengan menggunakan kecepatan 6,63 m/s dan $Re = 1376$ untuk kedua metode. Analisa dan pembahasan ini dijelaskan dalam beberapa bab dan sub bab.

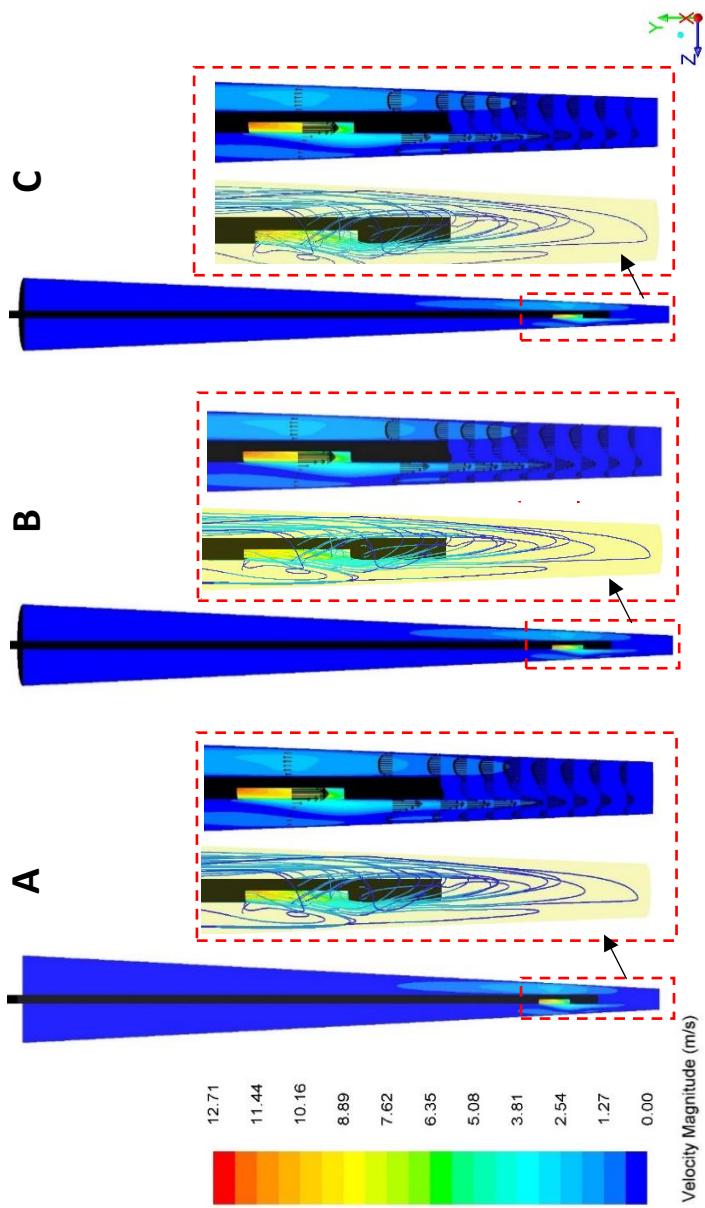
4.1 Perbandingan hasil data sepanjang saluran akar

Data yang ditampilkan pada sub bab ini yaitu profil kecepatan sepanjang saluran akar untuk metode tekanan positif dan tekanan negatif. Visualisasi aliran hasil simulasi numerik berupa kontur kecepatan, *pathlines* kecepatan, vektor kecepatan, kontur *wall shear stress*, dan kontur *pressure* yang diambil dari potongan saluran akar searah sumbu $x=0$. Hasil simulasi akan ditunjang dengan data kuantitatif berupa grafik untuk masing-masing metode. Re yang digunakan yaitu $Re = 1376$. Data tersebut diperoleh dari *post-processing* perangkat lunak *CFD* komersial.

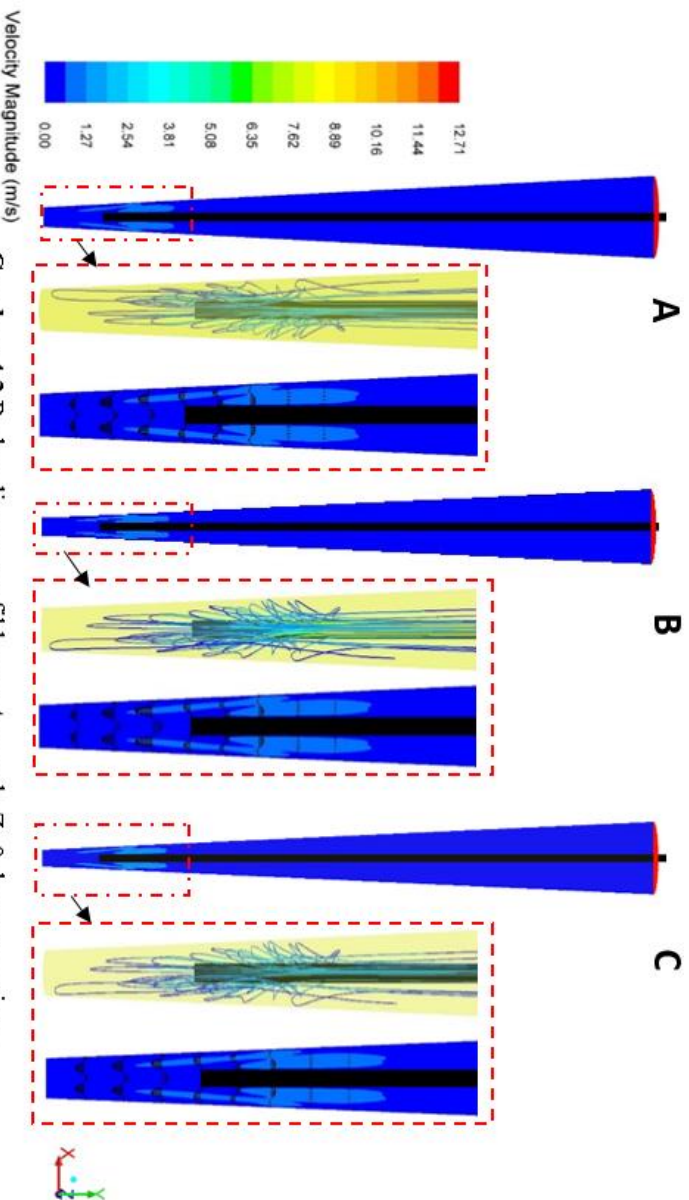
4.1.1 Perbandingan hasil data sepanjang saluran akar pada irigasi metode tekanan positif

Profil kecepatan aliran yang melewati jarum *side-vented* dan saluran akar menggunakan metode irigasi tekanan positif ditampilkan dalam bentuk visualisasi aliran sehingga dapat terlihat pola suatu aliran yang melewati saluran akar serta kontur kecepatan untuk memperjelas daerah-daerah dalam saluran akar yang memiliki pengaruh kuat terhadap terjadinya pertukaran irigan. Pertukaran irigan pada saluran akar ketika kecepatan aliran fluida irigan lebih besar dari 0,1 m/s dimana debris diasumsikan berbentuk bulat dengan diameter 15 μm .

Profil kecepatan ditampilkan untuk melihat bentuk aliran fluida pada saluran akar ketika melakukan proses irigasi atau pembersihan serta sejauh mana aliran dari jarum dapat menjangkau bagian-bagian pada saluran akar. Sampel saluran akar yang dibersihkan dengan metode tekanan positif adalah 3 buah yaitu dengan panjang saluran akar 21,5 mm, 20,9 mm dan 20,5 mm. Perkembangan profil kecepatan serta kontur kecepatan ketiga sampel saluran akar diilustrasikan pada gambar 4.1 dan 4.2.



Gambar 4.1 Perbandingan profil kecepatan pada $x=0$ dengan panjang saluran akar (a) 20,5 mm (b) 20,9 mm dan (c) 21,5 mm



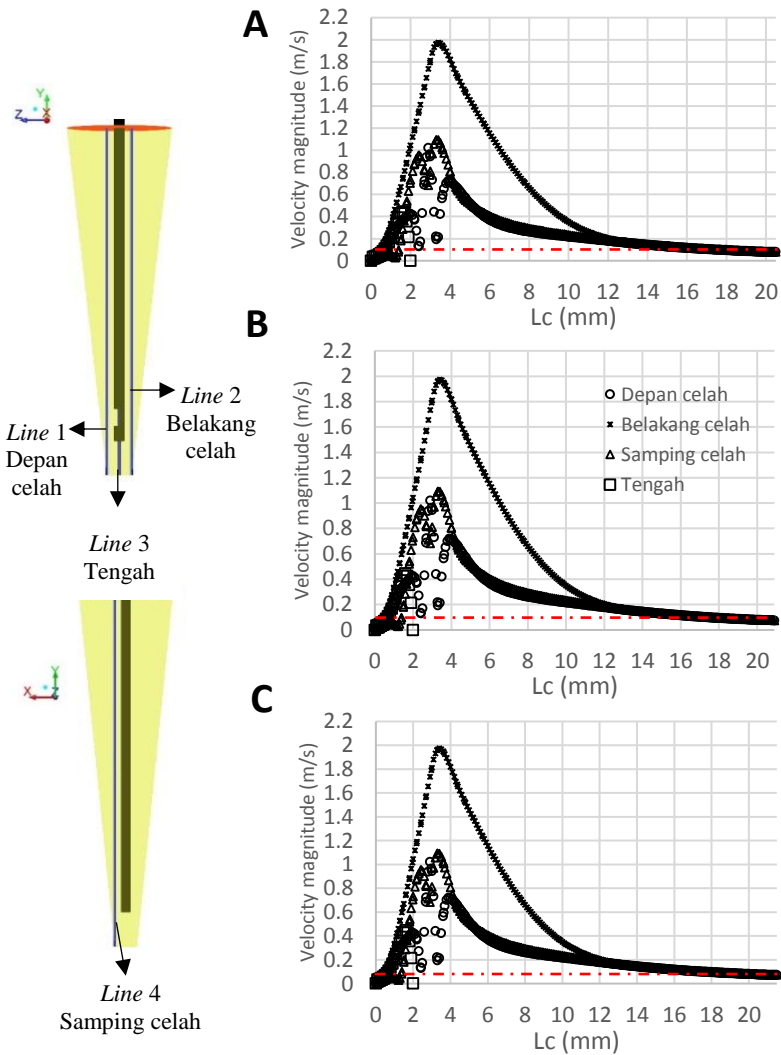
Gambar 4.2 Perbandingan profil kecepatan pada $Z=0$ dengan panjang saluran akar (a) 20,5 mm (b) 20,9 mm dan (c) 21,5 mm

Pada gambar 4.1 dapat terlihat aliran fluida yang keluar dari jarum *side-vented* berputar tidak beraturan menuju bagian bawah dan kemudian berputar naik keatas dari belakang jarum menuju *outlet*. Pada gambar 4.2 terlihat aliran juga terbagi 2 arah ke kiri dan ke kanan dari samping jarum hampir merata. Daerah yang ditampilkan oleh kontur kecepatan berwarna hijau menandakan kecepatan cukup tinggi sedangkan pada bagian apikal berberbentuk kotak tua menandakan kecepatan daerah tersebut rendah. Dari gambar terlihat distribusi warna pada bagian belakang jarum memiliki area yang lebih luas dan lebih panjang jika dibanding dibagian depan celah meskipun bentuk aliran ketiga variasi saluran akar hampir sama dan tidak ada perbedaan yang signifikan diantara 3 kontur kecepatan masing-masing sampel. Bentuk aliran yang tidak beraturan membuat aliran irigan semakin cepat terjadi perlambatan akibat bertabrakan dan tegangan geser. Aliran yang berada pada bagian jauh dari dinding lebih cepat jika dibandingkan dengan yang dekat dinding.

Fluida irigan tidak ada yang mencapai apikal dari setiap variasi saluran akar sehingga proses pembersihan dan pertukaran irigan kurang optimal pada bagian apikal. Jarak terjauh yang dapat dicapai oleh irigan untuk melakukan pertukaran adalah 0,95 mm dari ujung apikal. Kedalaman penyisipan jarum sejauh 2 mm dari ujung apikal. Sehingga agar proses pembersihan lebih optimal hingga ke apikal, kedalaman penyisipan jarum harus kurang dari 2 mm dari ujung apikal. Hasil yang membedakan antara ketiga variasi hanyalah jarak terjauh yang dapat dicapai oleh fluida irigan, namun selisih sangat kecil dan tidak signifikan. Untuk memperjelas visualisasi aliran fluida pada gambar 4.1 dan 4.2 akan dibahas pada gambar 4.3 dalam bentuk grafik.

Pertukaran irigan untuk mengangkat debris berada sebelum mencapai bagian *outlet* sehingga berarti debris keluar dari saluran akar dikarenakan irigan yang telah penuh pada saluran akar dan meluber keluar. Kecepatan yang tinggi diinginkan ketika proses pembilasan agar terjadi pertukaran irigan yang efektif dari ujung apikal hingga ke *cone orifice*. Kedalaman penyisipan jarum untuk tekanan positif dapat ditetapkan 1 mm dari apikal agar pembersihan efektif sampai ujung apikal karena jarak terjauh yang dapat dicapai adalah ± 1 mm. Variasi panjang saluran akar tidak berpengaruh signifikan pada bagian apikal.

Gambar grafik 4.3 terlihat 4 buah *trendline* untuk melihat kecepatan irigan pada saluran akar. *Trendline* berbentuk bulat menunjukkan kecepatan pada saluran akar didepan celah jarum *side-vented*. *Trendline* berbentuk silang menunjukkan kecepatan irigan pada bagian belakang jarum. *Trendline* berbentuk segitiga menunjukkan kecepatan irigan pada saluran akar di samping jarum. *Trendline* berbentuk kotak menunjukkan kecepatan irigan pada bagian tengah saluran akar dari ujung jarum hingga ujung apikal ($y=0$). Kecepatan tertinggi aliran fluida pada saluran yaitu sebesar 2 m/s yang berada pada bagian belakang celah, ditunjukkan dengan titik puncak pada *trendline* berbentuk silang. Pada bagian depan celah kecepatan irigan maksimum hanya mencapai kurang lebih 1,05 m/s dan tidak berbeda jauh dengan kecepatan maksimum pada bagian samping dari jarum yang sebesar 1,1 m/s. Pada bagian dibawah ujung jarum hingga apikal kecepatan maksimal hanya sebesar 0,5 m/s. Pada bagian *outlet* terlihat keempat *trendline* berada dibawah garis 0,1 m/s yang berarti pertukaran irigan tidak mencapai bagian *outlet*.

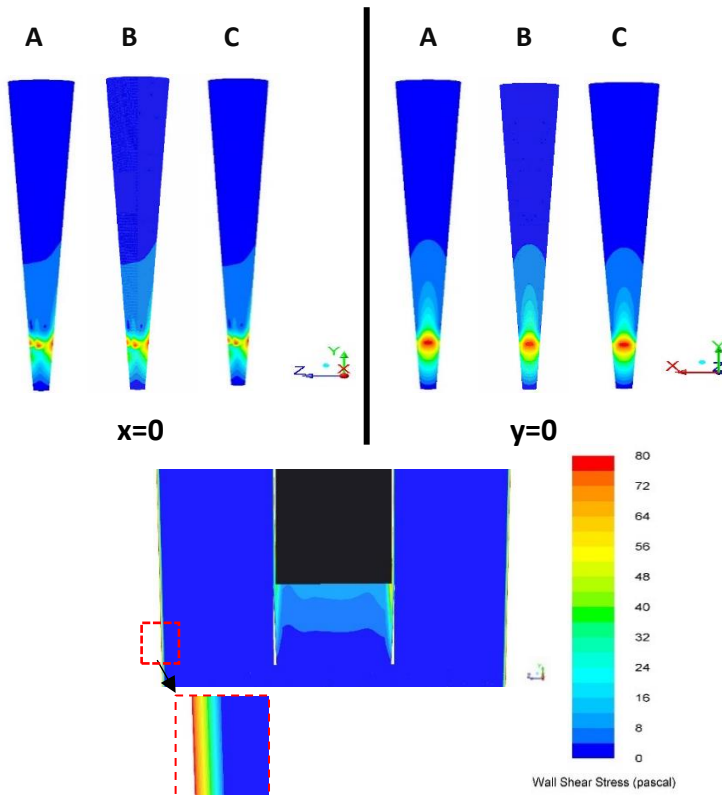


Gambar 4.3 Grafik kecepatan pada saluran akar dengan panjang (a) 20,5 mm (b) 20,9 mm dan (c) 21,5 mm

Dari grafik 4.3 terlihat tidak ada *trendline* yang kecepatannya memenuhi syarat untuk terjadinya pertukaran irigan yaitu sebesar 0,1 m/s pada bagian ujung apikal. Kecepatan 0,1 m/s untuk keempat *trendline* terbatas pada posisi kurang lebih $L_c = 1$ mm. Grafik 4.3 memperjelas visualisasi kecepatan pada gambar 4.1 dan 4.2 dengan data kuantitatif. Ketiga grafik juga tidak menunjukkan adanya perbedaan bentuk dan *trendline* yang berarti memperjelas bahwa variasi panjang saluran akar tidak berpengaruh pada bentuk pola aliran dan juga nilai kecepatannya. Grafik 4.3 menunjukkan grafik kecepatan pada saluran akar dengan 3 variasi panjang saluran akar yaitu 20,5 mm, 20,9 mm dan 21,5 mm menggunakan metode irigasi tekanan positif.

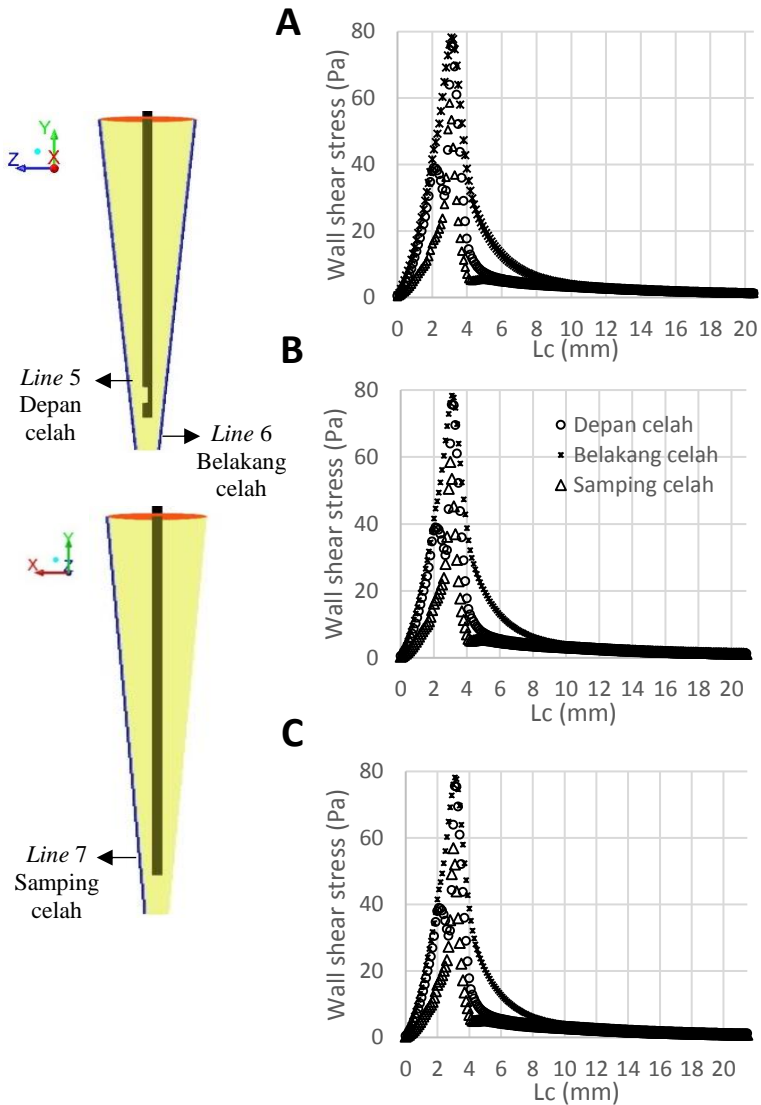
Dari gambar 4.3, ditunjukkan kecepatan y terhadap posisi panjang kerja saluran akar. Posisi 0 mm adalah posisi ujung apikal. Garis merah menunjukkan kecepatan sebesar 0,1 m/s yang berarti terjadinya pertukaran irigan (**Boutsiouskis, 2010**). Kecepatan aliran irigan akan berpengaruh pada nilai *wall shear stress* untuk mengangkat debris pada bagian dinding saluran akar.

Gambar 4.4 menunjukkan tegangan geser berada pada bagian dinding saluran akar dan diujung jarum *side-vented* akibat aliran balik yang keluar menuju *outlet*. Fluida yang berbenturan dengan dinding menyebabkan tegangan geser. Dari gambar dapat dilihat tegangan geser dinding yang terbesar terfokus pada area disekitar celah dan di dinding jarum disebabkan oleh nilai kecepatan yang besar. Fluida pada penelitian ini adalah *Newtonian* sehingga fluida ini tegangan gesernya berbanding lurus secara linier dengan gradien kecepatan pada arah tegak lurus dengan bidang geser. Nilai tegangan geser yang besar akan menghasilkan energi yang besar untuk mengangkat debris pada dinding apikal hingga ujung apikal.



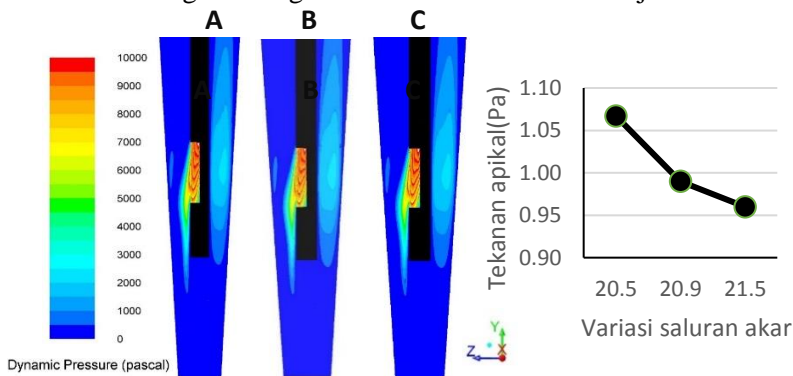
Gambar 4.4 Kontur *wall shear stress* di dinding *cone* pada saluran akar (a) 20,5 mm (b) 20,9 mm (c) 21,5 mm dan pada bagian dinding

Pada saluran akar, tegangan geser maksimum bernilai kurang lebih 80 Pa pada bagian belakang jarum ditunjukkan pada *trendline* berbentuk silang yang terlihat pada pada grafik. Grafik tegangan geser pada setiap variasi panjang saluran akar tidak memiliki perbedaan signifikan karena pola alirannya sama terlihat pada gambar 4.5.

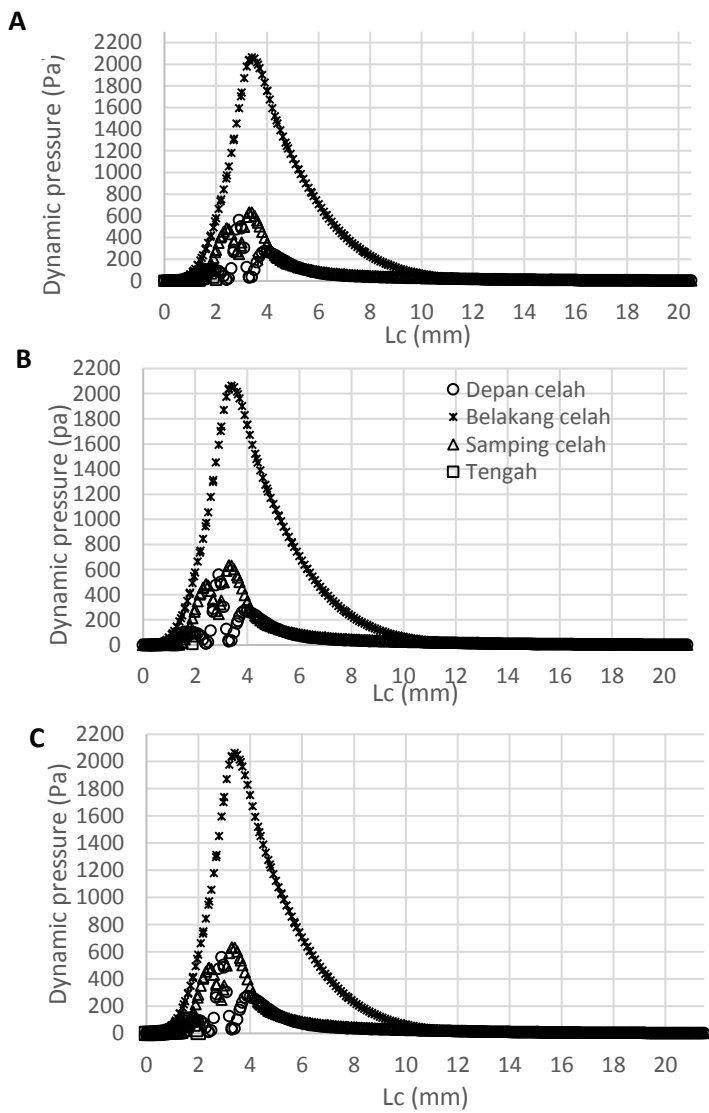


Gambar 4.5 Grafik *wall shear stress* pada saluran akar (a) 20,5 mm (b) 20,9 mm dan (c) 21,5 mm

Kontur tekanan dinamis pada saluran akar digunakan untuk menentukan layak tidaknya metode tersebut digunakan, karena jika tekanan dinamis yang menabrak pada dasar saluran akar atau apikal itu terlalu besar maka akan terjadi kecelakaan yang dapat berakibat fatal pada manusia oleh karena fluida menembus saluran akar sehingga terjadi pendarahan bahkan pembengkakan. Selain itu, tekanan dinamis akan berbanding lurus dengan hasil dari tegangan geser dinding dan nilai kecepatan. Distribusi tekanan dinamis pada metode tekanan positif setiap variasi panjang saluran akar adalah sama. Terlihat bahwa distribusi tekanan dinamis yang diambil dalam setiap saluran akar memiliki nilai tertinggi yaitu kurang lebih 2100 Pascal atau 2,1 kPa pada bagian sekitar celah memiliki kecepatan tinggi. Sementara itu, hasil rata-rata tekanan dinamis pada bagian dasar saluran akar adalah 1,07 Pa karena irigan tidak mencapai dasar apikal. Nilai tersebut didapat menggunakan *Facet average* yang di tempatkan pada dasar saluran akar atau $y=0$. Ilustrasi gambar dapat dilihat pada gambar 4.6. Grafik tekanan dinamis menunjukkan bahwa semakin pendek saluran akar maka semakin besar nilai tekanan pada ujung apikal, namun nilai ini cukup kecil bila dibandingkan dengan tekanan dinamis didalam jarum.



Gambar 4.6 Kontur dan grafik *dynamic pressure* pada ujung apikal saluran akar (a) 20,5 mm (b) 20, 9 mm dan (c) 21,5 mm



Gambar 4.7 Grafik tekanan dinamis pada saluran akar (a) 20,5 mm (b) 20,9 mm dan (c) 21,5 mm

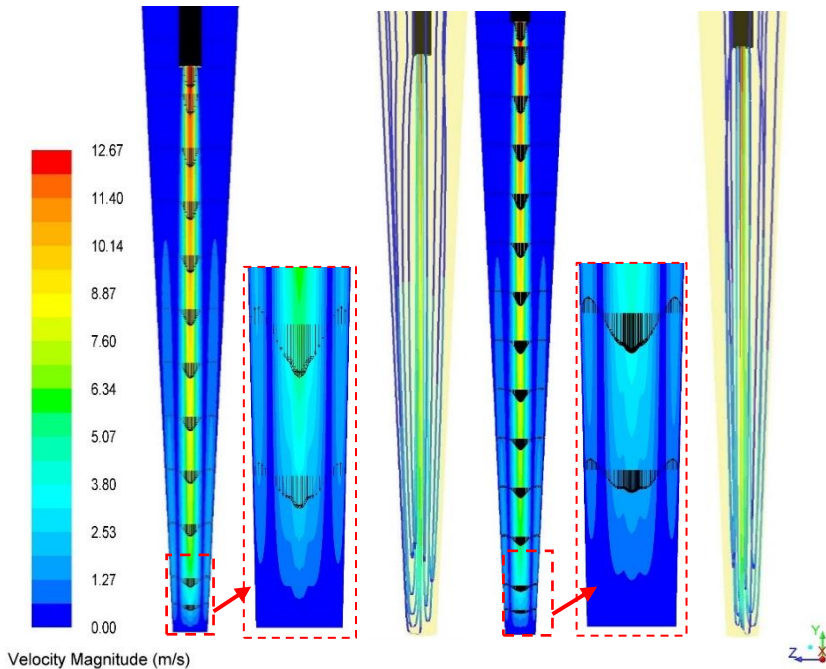
Dari grafik 4.7 terlihat 4 buah *trendline* untuk melihat tekanan dinamis pada saluran akar. Pengambilan data menggunakan *line/rake* pada posisi pengambilan data sama seperti kecepatan. *Trendline* berbentuk bulat menunjukkan tekanan dinamis pada saluran akar didepan celah jarum *side-vented*. *Trendline* berbentuk silang menunjukkan tekanan dinamis irigan pada bagian belakang jarum. *Trendline* berbentuk segitiga menunjukkan tekanan dinamis irigan pada saluran akar di samping jarum. *Trendline* berbentuk kotak menunjukkan tekanan dinamis irigan pada bagian tengah saluran akar dari ujung jarum hingga ujung apikal ($y=0$). Tekanan dinamis tertinggi pada saluran yaitu sebesar 2100 Pa yang berada pada bagian belakang celah, ditunjukkan dengan titik puncak pada *trendline* berbentuk silang. Pada bagian depan celah tekanan dinamis irigan maksimum hanya mencapai kurang lebih 600 Pa dan tidak berbeda jauh dengan tekanan dinamis terbesarnya pada bagian samping dari jarum yang sebesar 650 m/s. Pada bagian dibawah ujung jarum hingga apikal tekanan dinamis maksimal hanya sebesar 0,5 m/s.

Grafik 4.7 memperjelas visualisasi kecepatan pada gambar 4.6 dengan data kuantitatif. Ketiga grafik juga tidak menunjukkan adanya perbedaan bentuk dan *trendline* yang berarti memperjelas bahwa variasi panjang saluran akar tidak berpengaruh pada bentuk pola aliran dan juga nilai tekanan dinamis.

4.1.2 Perbandingan hasil data sepanjang saluran akar pada irigasi metode tekanan negatif

Profil kecepatan aliran yang melewati jarum *open-ended* dan saluran akar menggunakan metode irigasi tekanan negatif ditampilkan dalam bentuk visualisasi aliran sehingga dapat terlihat pola suatu aliran yang melewati saluran akar serta kontur kecepatan untuk memperjelas daerah-daerah dalam saluran akar yang memiliki pengaruh kuat terhadap terjadinya pertukaran irigan. Pertukaran irigan pada saluran akar ketika

kecepatan aliran fluida irigan lebih besar dari 0,1 m/s dimana debris diasumsikan berbentuk bulat dengan diameter 15 μm . Profil kecepatan ditampilkan untuk melihat bentuk aliran fluida pada saluran akar ketika melakukan proses irigasi atau pembersihan serta sejauh mana aliran dari jarum dapat menjangkau bagian-bagian pada saluran akar. Sampel saluran akar yang dibersihkan dengan metode tekanan positif adalah 2 buah yaitu dengan panjang saluran akar 20,5 mm dan 22,5 mm. kecepatan fluida irigan yang diinjeksikan sebesar 6,63 m/s dengan tekanan hisap pada *outlet* sebesar -20kPa. Pada proses irigasi, kecepatan yang tinggi diinginkan agar proses pertukaran irigan terjadi secara efektif dan dapat mengangkat debris.

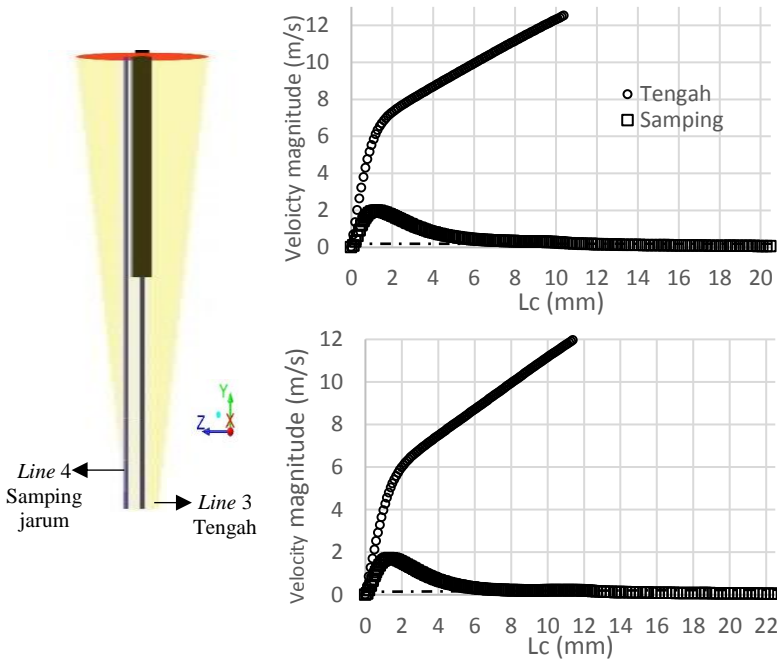


Gambar 4.8 Perbandingan kontur kecepatan dan vektor pada saluran akar dengan panjang 20,5 mm (kiri) dan 22,5 mm (kanan)

Dapat terlihat dari gambar 4.8 aliran fluida yang keluar dari jarum *open-ended* bergerak lurus langsung menuju apikal. Daerah yang ditampilkan oleh kontur kecepatan berwarna hijau menandakan kecepatan cukup tinggi, sedangkan pada bagian apikal berwarna biru tua menandakan kecepatan daerah tersebut rendah. Bentuk aliran kedua variasi saluran akar hampir sama dan tidak ada perbedaan yang signifikan diantara kedua kontur kecepatan masing-masing sampel. Fluida irigan pada metode tekanan negatif mencapai apikal dari setiap variasi saluran akar sehingga proses pembersihan dan pertukaran irigan optimal pada bagian apikal. Kedalaman penyisipan jarum ditetapkan sejauh 10 mm dari bagian *outlet* saluran akar.

Hasil yang membedakan antara kedua variasi nilai kecepatan jika diambil pada suatu posisi, namun tidak terlalu signifikan. Perbedaan panjang saluran yang digunakan pada simulasi ini berakibat pada distribusi kecepatan yang terjadi. Distribusi kecepatan yang sampai apikal untuk panjang saluran akar 22,5 mm akan lebih rendah daripada yang terjadi pada saluran akar 20,5 mm. Ilustrasi gambar dapat dilihat pada gambar 4.8, dimana pada gambar grafik tersebut kecepatan aliran menurun drastis pada 2 mm dari dasar saluran akar.

Kecepatan pada 2 mm dari dasar saluran akar untuk variasi 20,5 mm adalah 7.5 m/s, sedangkan variasi 22,5 mm adalah 6 m/s. Kemudian kecepatan tersebut menurun dengan signifikan hingga berbenturan dengan apikal. Nilai kecepatan untuk kedua variasi panjang saluran akar pada tekanan negatif cukup efektif untuk melakukan pertukaran irigan dan mengangkat debris keluar dari saluran akar. Kecepatan aliran akan sangat berpengaruh pada nilai *wall shear stress* dan tekanan dinamis pada area dinding saluran akar. Untuk memperjelas visualisasi aliran fluida pada gambar 4.8 akan ditampilkan pada gambar 4.9 dalam bentuk grafik.



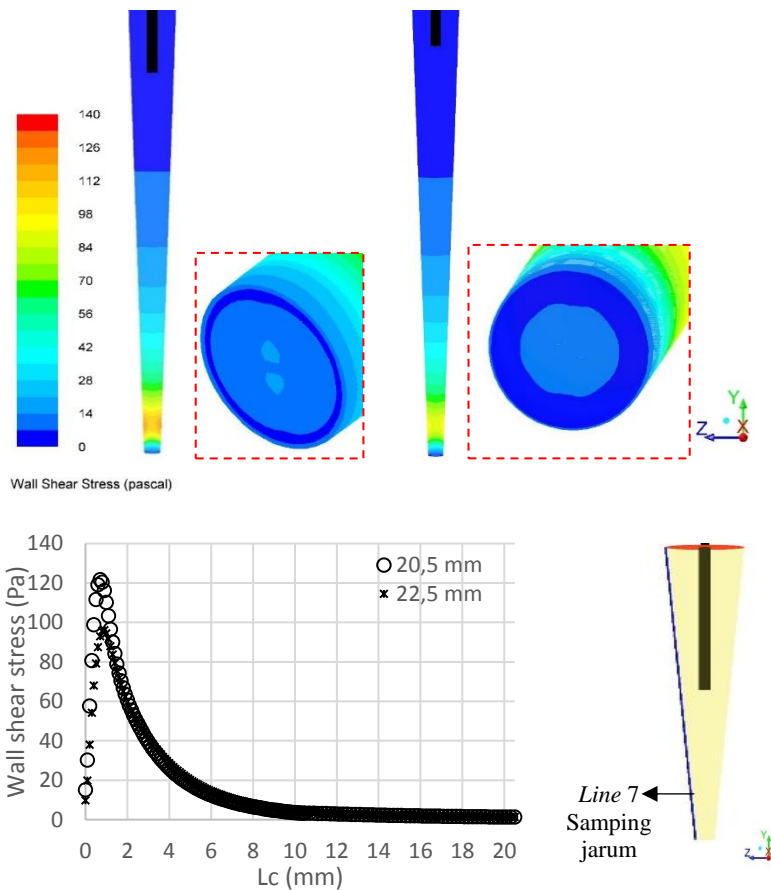
Gambar 4.9 Grafik kecepatan pada saluran dengan panjang 20,5 mm (atas) dan 22,5 (bawah)

Dari grafik 4.9 terlihat 2 buah *trendline* untuk melihat kecepatan irigan pada saluran akar. *Trendline* berbentuk kotak menunjukkan kecepatan pada saluran akar disamping jarum *open-ended*. *Trendline* berbentuk bulat menunjukkan kecepatan irigan pada bagian tengah saluran akar dari ujung jarum hingga ujung apikal ($y=0$). Kecepatan tertinggi aliran fluida pada saluran yaitu sebesar 13 m/s yang berada pada bagian keluaran dari ujung jarum, ditunjukkan dengan titik puncak pada *trendline* berbentuk bulat. Pada bagian samping jarum kecepatan irigan maksimum hanya mencapai kurang lebih 2 m/s. *Trendline* berbentuk bulat hanya sampai $L_c = 10,5$ mm dan $L_c = 12,5$ mm karena hanya meninjau aliran setelah keluar dari

jarum hingga apikal, sedangkan *trendline* kotak meninjau dari apikal hingga *cone orifice*.

Pada bagian *outlet* terlihat *trendline* kotak berada hampir 0,1 m/s yang berarti pertukaran irigan mencapai bagian *outlet* akibat adanya hisapan sehingga pertukaran irigan menggunakan metode negatif efektif sepanjang saluran akar. Grafik 4.9 memperjelas visualisasi kecepatan pada gambar 4.8 dengan data kuantitatif. Kedua grafik juga tidak menunjukkan adanya perbedaan bentuk dan *trendline* yang berarti memperjelas bahwa variasi panjang saluran akar tidak berpengaruh pada bentuk pola aliran dan juga nilai kecepatannya.

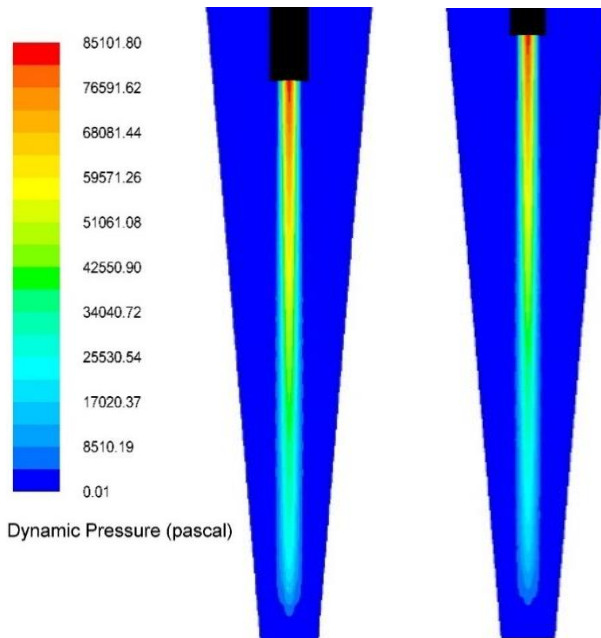
Nilai kecepatan akan berpengaruh terhadap tegangan geser pada dinding saluran akar. Gambar 4.10 menampilkan kontur *wall shear stress* setiap variasi saluran akar. *Wall shear stress* pada irigasi metode tekanan negatif untuk setiap variasi saluran akar tidak memiliki perbedaan kontur yang signifikan dan hampir sama. Gambar kontur menunjukkan *wall shear stress* berada pada bagian dinding saluran akar dan dibagian apikal. Distribusi tegangan geser pada metode tekanan negatif dengan panjang saluran akar 20,5 mm dan 22,5 mm adalah sama. Terlihat bahwa distribusi tegangan geser yang besar pada daerah apikal dikarenakan *backflow* yang terjadi pada daerah tersebut dan mengakibatkan fluida berbenturan dengan dinding sehingga menyebabkan tegangan geser. Penurunan nilai tegangan geser bergradasi dari bagian paling bawah menuju ke bagian atas. Pada saluran akar bagian atas tegangan geser tersebut bernilai sangat kecil terlihat pada gambar 4.10. Fluida pada penelitian ini adalah *Newtonian* sehingga fluida ini tegangan gesernya berbanding lurus secara linier dengan gradien kecepatan pada arah tegak lurus dengan bidang geser. Jika nilai kecepatan besar maka tegangan geser juga akan semakin besar. Nilai tegangan geser yang besar akan menghasilkan energi yang besar untuk mengangkat debris pada dinding apikal hingga ujung apikal.



Gambar 4.10 Kontur *wall shear stress* saluran akar (a) 20,5 mm dan (b) 22,5 pada bagian dinding dan grafik perbandingan *wall shear stress*

Pada saluran akar, tegangan geser maksimum bernilai kurang 120 Pa pada area dekat apikal ditunjukkan pada *trendline* berbentuk bulat yang terlihat pada pada grafik. Pada variasi panjang saluran akar 20,5 mm terlihat untuk skala

tegangan geser 140 Pa masih memiliki kontur berwarna orange sehingga pada bagian tersebut nilainya adalah yang tertinggi dan mendekati 140 Pa, sedangkan pada variasi 22,5 mm hanya berwarna kuning sehingga tegangan geser yang terjadi pada saluran akar 22,5 mm lebih kecil daripada variasi 20,5 mm. Tegangan geser maksimum pada saluran akar panjang 22,5 mm yaitu 100 Pa. Semakin panjang saluran akar maka nilai tegangan geser dindingnya akan berkurang karena kecepatannya yang juga lebih kecil,

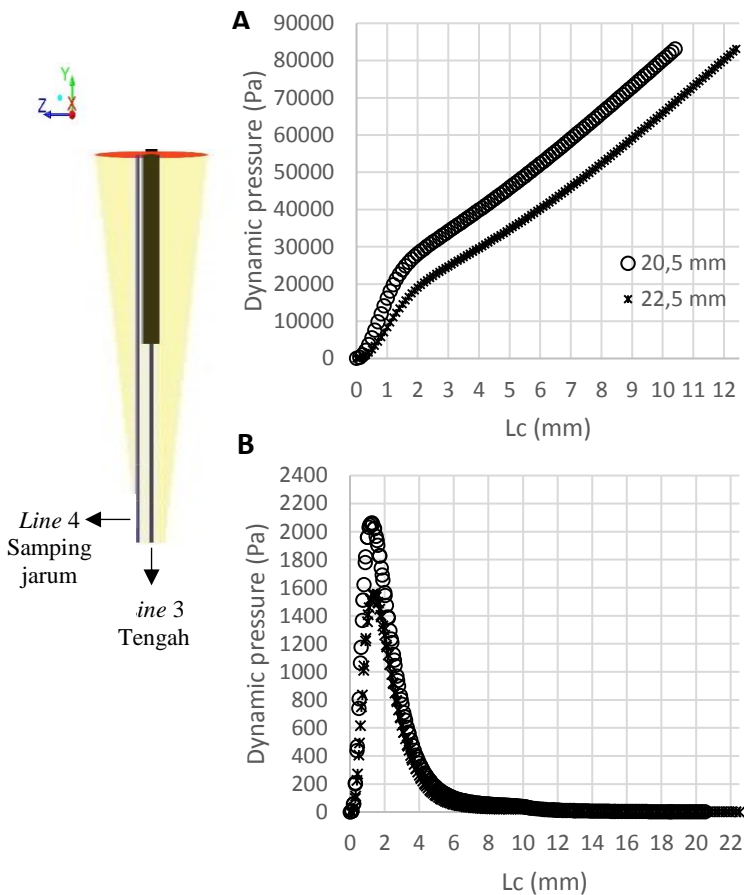


Gambar 4.11 Visualisasi kontur tekanan dinamis pada panjang saluran akar 20,5 mm (kiri) dan 22,5 (kanan)

Gambar 4.11 menunjukkan kontur tekanan dinamis pada saluran akar yang digunakan untuk menentukan layak tidaknya

metode tersebut digunakan, karena jika tekanan dinamis yang menabrak pada dasar saluran akar atau apikal itu terlalu besar maka akan terjadi kecelakaan yang dapat berakibat fatal pada manusia seperti pendarahan dan pembengkakan. Selain itu, tekanan dinamis akan berbanding lurus dengan hasil dari tegangan geser dinding. Secara umum distribusi tekanan dinamis pada tekanan negatif lebih terdistribusi merata pada saluran akar. Hal ini disebabkan adanya jarak apikal dengan ujung jarum yang begitu jauh sehingga tidak terjadi tabrakan dengan dinding dengan tekanan yang tinggi.

Kontur dari tekanan dinamis ini sendiri mirip dengan kontur kecepatan. Tekanan dinamis ini terjadi karena adanya fluida yang mengalir dengan kecepatan yang tinggi. Kedalaman penyisipan jarum untuk metode tekanan negatif tidak boleh terlalu dekat dengan apikal karena nilai tekanan yang tinggi dan berisiko. Distribusi tekanan dinamis pada metode tekanan negatif dengan panjang saluran akar 20,5 mm dan 22,5 mm dengan jarum dimasukkan kedalam saluran akar hanya 10 mm dari *outlet* saluran akar adalah hampir sama. Terlihat bahwa distribusi tekanan dinamis yang diambil dalam setiap saluran akar memiliki nilai tertinggi yaitu 85101,80 Pascal atau 85,102 kPa. Semakin panjang saluran maka akan semakin kecil tekanan dinamis pada ujung apikal karena kedalaman penyisipan jarum ditetapkan 10 mm dari *outlet* saluran akar meskipun tidak signifikan. Selain itu, hasil rata-rata tekanan dinamis pada bagian dasar saluran akar adalah 40 Pa. Nilai tersebut didapat menggunakan *facet average* yang di tempatkan pada dasar saluran akar atau $y=0$. Gambar 4.12 memperjelas visualisasi tekanan dinamis dengan menampilkan data kuantitatif berupa grafik tekanan dinamis.



Gambar 4.12 Grafik tekanan dinamis (a) pada keluaran jarum hingga ke apikal (*line 3*) dan (b) dari dasar saluran akar hingga ke *outlet* saluran akar (*line 4*)

Pada grafik (a) terlihat bahwa tekanan dinamis dari dengan nilai yang tinggi berada pada keluaran jarum yang kemudian semakin menurun hingga kedasar saluran akar. Hal tersebut terjadi karena jarak antara ujung jarum dengan dasar saluran akar yang jauh. Selain itu, pada area mendekati dasar

saluran akar (apikal) terjadi penurunan secara signifikan pada sampel 20,5 mm yang terletak pada titik ± 1 mm dari apikal, sedangkan pada sampel 22,5 mm tidak ada penurunan secara signifikan. Kemudian, dari grafik (a) juga dapat dilihat bahwa sampel 22,5 mm terjadi penurunan terlebih dahulu karena letak ujung jarum yang berbeda. Pada sampel 20,5 mm ujung jarum terletak pada 10.5 mm sedangkan pada sampel 22,5 mm terletak pada 12.5 mm. Pada grafik (b) menunjukkan bahwa pada distribusi tekanan dinamis mengalir dari dasar saluran akar (0 mm) hingga ke *outlet* (20,5 mm dan 22,5 mm). Pada grafik tersebut terlihat bahwa sampel 22,5 mm memiliki titik puncak lebih kecil daripada sampel 20,5 mm. Hal ini disebabkan oleh tekanan dinamis yang dari grafik (a) lebih besar sampel 20,5 mm karena penempatan jarum lebih dekat daripada sampel 22,5 mm. Kenaikan kedua sampel sangat signifikan dari jarak 0 mm hingga ± 1 mm dengan nilai puncak pada sampel 22,5 adalah 1500 Pa sedangkan pada sampel 20,5 mencapai 2000 Pa. Setelah mencapai titik puncak, tekanan dinamis kembali turun hingga mencapai mendekati 0 Pa. Hal tersebut dikarenakan perubahan luas penampang dan melambatnya kecepatan yang terjadi di area tersebut.

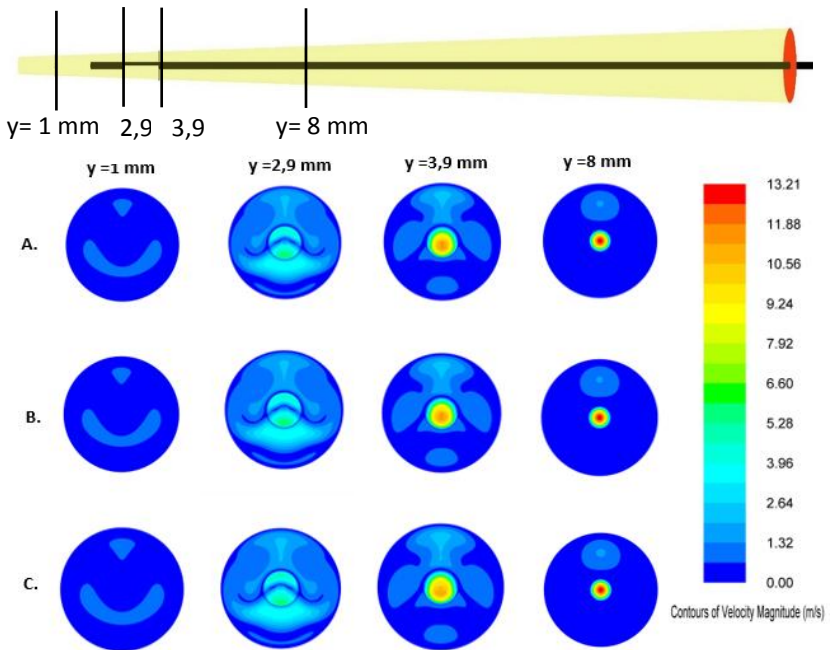
4.2 Visualisasi kontur kecepatan setiap *surface cross-section*

Pada bab ini akan disampaikan data berupa visualisasi aliran dengan vektor kecepatan dan kontur *pathlines* di setiap *surface cross-section* yang diambil dari perangkat lunak *CFD* komersial. Dari visualisasi aliran tersebut akan diperoleh perbandingan yang jelas mengenai perilaku aliran yang terjadi pada saluran akar secara 3D. Hasil dari masing-masing *surface cross-section* yang diambil akan dijelaskan pada sub-bab selanjutnya.

4.2.1 Visualisasi kontur kecepatan setiap *surface cross-section* pada irigasi metode tekanan positif

Visualisasi kontur kecepatan setiap *surface cross-section* pada irigasi metode tekanan positif dengan jarum *side-vented* mampu memberikan informasi tentang jarak terjauh yang dapat dicapai irigan dan memberikan gambaran pengaruh variasi ukuran saluran akar terhadap bentuk alirannya. *Surface cross-section* yang diambil mulai dari apikal hingga hampir mencapai *outlet* saluran akar. Terlihat bahwa pada gambar 4.13 terdapat gambar potongan *iso-surface* untuk membandingkan kontur kecepatan ketiga sampel pada berbagai posisi. Posisi yang ditampilkan pada pembahasan ini pada posisi 1 mm, 2,9 mm, 3,9 mm, dan 8 mm, sedangkan untuk posisi yang lain akan ditampilkan pada halaman lampiran. Ketiga sampel memiliki kecepatan tertinggi sama, yaitu pada 13,21 m/s sehingga nilai maksimal perbandingan kecepatannya pada *legend* menggunakan kecepatan tersebut.

Pada gambar 4.13 dapat terlihat kontur pada ketiga variasi panjang saluran akar tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Posisi 0 mm diposisikan pada ujung apikal. Pada posisi $y=1$ mm, kontur kecepatan mulai menipis yang berarti kecepatan aliran semakin lambat menuju ke apikal. Pada posisi 2,9 mm yaitu dekat bagian bawah celah terlihat berbentuk kotak tersebar yang artinya memiliki kecepatan. Pada posisi 3,9 mm aliran irigan sudah mulai berkurang pada bagian depan celah jarum namun masih cukup cepat pada bagian belakang. Pada posisi $y=8$ mm, kontur kecepatan juga mulai menipis yang berarti aliran semakin lambat menuju *outlet* hingga pada akhirnya meluap keluar dari saluran akar. Hal ini menunjukkan variasi panjang saluran akar tidak berpengaruh terhadap pola aliran dan konturnya



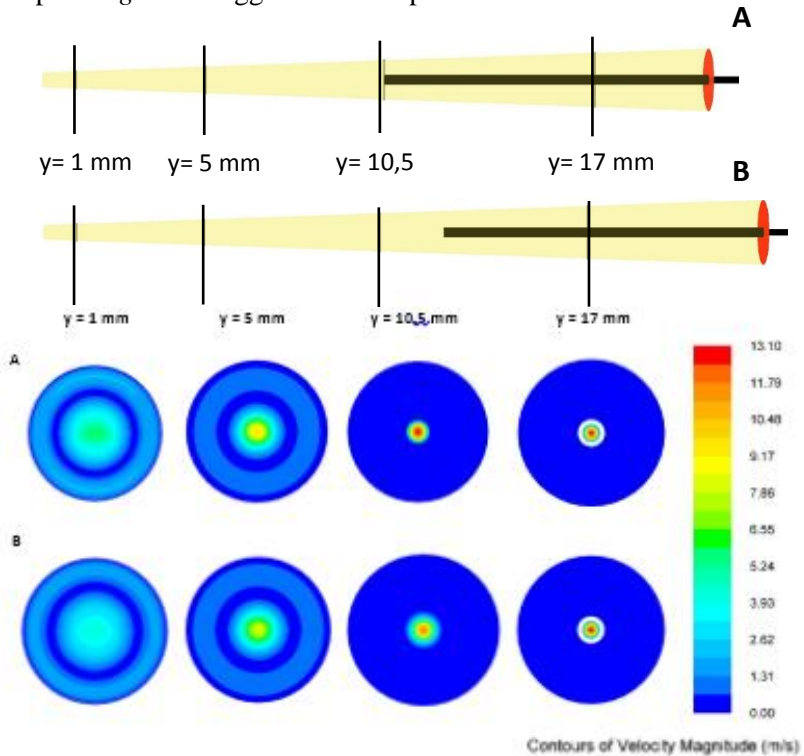
Gambar 4.13 Visualisasi kontur kecepatan pada *surface cross-section* pada saluran akar dengan panjang (a) 20,9 mm (b) 21,5 mm dan (c) 20,5 mm

4.2.2 Visualisasi kontur kecepatan setiap *surface cross-section* pada irigasi metode tekanan negatif

Visualisasi kontur kecepatan setiap *surface cross-section* pada irigasi metode tekanan negatif dengan jarum *flat* mampu memberikan informasi tentang jarak terjauh yang dapat dicapai irigan dan memberikan gambaran pengaruh variasi ukuran saluran akar terhadap bentuk alirannya. *Surface cross-section* yang diambil mulai dari apikal hingga hampir mencapai *outlet* saluran akar.

Pada gambar 4.14, kontur kecepatan divisualisasikan dari sudut yang berbeda yaitu pada *surface cross-section* seperti

yang telah dijelaskan pada bab 3. Posisi $y=0$ ditetapkan pada ujung apikal. Posisi pengambilan *iso-surface* ditentukan pada posisi 1 mm, 5 mm, 10,5 mm dan 17 mm, sedangkan untuk posisi yang lain akan ditampilkan pada halaman lampiran. Ketiga sampel memiliki kecepatan tertinggi sama, yaitu pada 13,10 m/s sehingga nilai maksimal perbandingan kecepatannya pada *legend* menggunakan kecepatan tersebut.



Gambar 4.14 Visualisasi kontur kecepatan pada *surface cross-section* pada saluran akar dengan panjang (a) 20,5 mm dan (b) 22,5 mm

Pada gambar 4.14 terlihat bahwa tampilannya menggunakan kontur kecepatan terlihat menyebar ke

segala arah. Terlihat bahwa pada posisi 1 mm kontur kecepatan pada variasi saluran akar 22,5 mm lebih rendah daripada kontur kecepatan pada saluran akar 20,5 mm. Terlihat bahwa pada saluran akar 20,5 mm bagian tengah atau bagian yang mengalir ke arah dasar apikal memiliki kontur hijau lalu bergradasi hingga biru muda dan biru tua, sedangkan pada saluran akar 22,5 mm warna kontur biru muda yang bergradasi hingga biru tua. Selain itu pada bagian keluar saluran akar kontur kecepatannya juga lebih besar pada saluran akar 20,5 mm terlihat pada bagian aliran terluar masih memiliki kontur biru muda yang menunjukkan bahwa aliran pada bagian tersebut lebih besar. Pada titik 5 mm terlihat bahwa terdapat perbedaan pada bagian kontur aliran yang menuju ke dasar saluran akar.

Pada kontur kecepatan variasi saluran akar 20,5 mm memiliki warna kuning yang lebih luas pada bagian tengah dibanding saluran akar dengan panjang 22,5 mm tidak terlalu luas. Hal tersebut juga terjadi pada setiap titik yang diambil, pada titik 10,5 kontur 20,5 mm memiliki kontur warna cokelat tua, sedangkan pada kontur kecepatan 22,5 mm hanya memiliki kontur warna coklat muda. Pada titik 17 mm terlihat bahwa terdapat kontur putih atau tidak terdapat pada skala warna yang ada. Hal tersebut diakibatkan karena pada titik tersebut terdapat jarum yang memiliki diameter luar sehingga pada bagian tersebut tidak memiliki kontur.

Perbedaan variasi saluran akar sangat signifikan mempengaruhi kecepatan yang ada pada *section* saluran akar. Perbedaan panjang saluran yang digunakan pada simulasi ini berakibat pada distribusi kecepatan yang terjadi. Kecepatan pada 2 mm dari dasar saluran akar untuk variasi 20,5 mm adalah 7,5 m/s, sedangkan variasi 22,5 mm adalah 6 m/s. Kemudian kecepatan tersebut menurun dengan signifikan hingga berbenturan dengan apikal. Dari gambar dapat terlihat kontur pada kedua variasi panjang saluran akar tidak memiliki perbedaan yang signifikan.

4.3 Perbandingan data irigasi tekanan positif dan tekanan negatif

Pada sub bab ini akan disampaikan data kuantitatif dan kualitatif dari variasi metode irigasi saluran akar, yaitu tekanan positif dan tekanan negatif. Data kualitatif berupa kontur, dan *pathlines* kecepatan, kontur *wall shear stress*, kontur tekanan dan penampilan kontur pada *iso-surface*. Data kuantitatif berupa grafik dan tabel untuk memperjelas visualisasi dan hasil simulasi. Hasil simulasi numerik pada saluran akar dengan panjang 20,5 mm akan dibandingkan. Pada metode tekanan positif, kedalaman penyisipan jarum hingga sejauh 2 mm dari apikal sedangkan pada tekanan negatif sejauh 10 mm dari *outlet* saluran akar. Data kuantitatif dari hasil variasi metode irigasi disampaikan berupa tabel dan grafik serta gambar.

Tabel 4.1 Perbandingan hasil simulasi

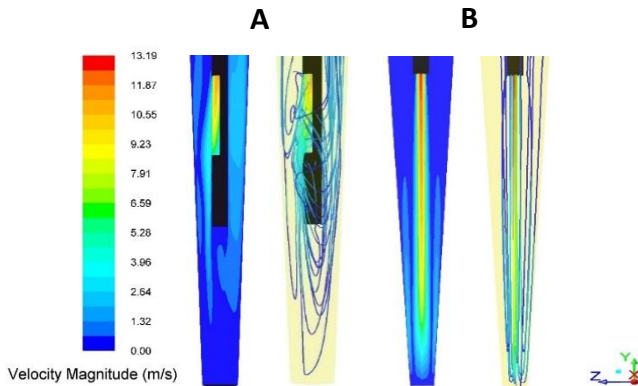
Metode irigasi	<i>Dynamic pressure</i> (pa)	<i>Wall shear stress</i> (pa)	<i>Max. velocity magnitude</i> (m/s)	Jarak terjauh (mm)
Tekanan positif	2100	80	2	0,95 mm dari apikal
Tekanan negatif	85101	120	12,6	0 mm dari apikal

Hasil simulasi pada tabel 4.1 diatas diambil pada nilai maksimum setiap metode. Irigasi metode tekanan positif dengan jarum *side-vented* hanya dapat mencapai jarak 0,95 mm dari apikal karena kecepatan maksimal setelah keluar dari jarum hanya sebesar 2 m/s. Pada irigasi tekanan negatif, pertukaran irigan dapat mencapai ujung apikal dengan kecepatan maksimum 12,6 m/s yaitu pada saat keluar dari ujung jarum. Nilai *wall shear stress* dan tekanan dinamis pada apikal juga lebih besar jika dibandingkan dengan tekanan positif. Nilai *wall shear stress* dan tekanan dinamis berbanding lurus dengan nilai kecepatan. Pada metode tekanan negatif, kecepatan fluida jauh lebih cepat dibanding tekanan positif

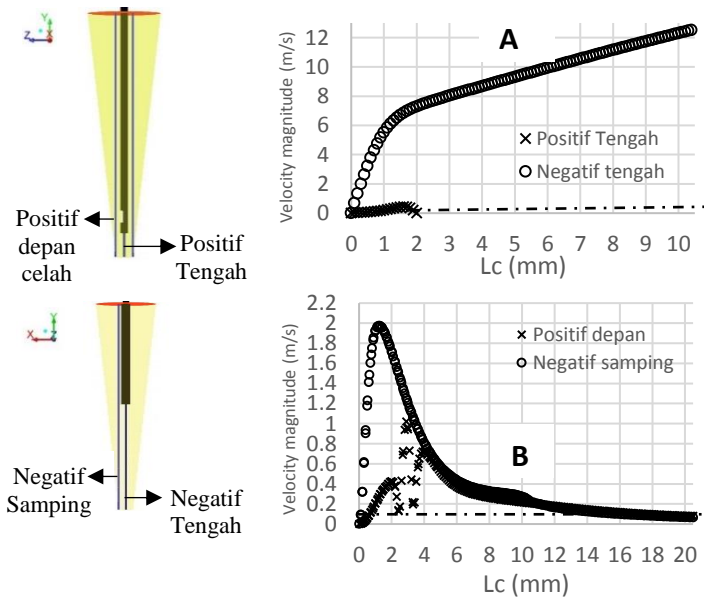
sehingga energi untuk mengangkat debris pada dinding saluran akar lebih besar akibat tegangan geser. Nilai tekanan dinamis pada tekanan negatif juga jauh lebih tinggi pada bagian ujung jarum namun ketika pada bagian apikal tekanannya telah menurun dan masih aman untuk proses irigasi.

Nilai kecepatan, *wall shear stress* dan tekanan dinamis pada tabel 4.1 diatas dipengaruhi oleh pola aliran yang sangat berbeda. Pada tekanan positif irigan keluar dari celah samping sementara pada tekanan negatif jarum berbentuk *open-ended*. Fluida irigan yang keluar menggunakan jarum *side-vented* terfokus pada satu sisi bagian saluran akar saja, yaitu pada sisi celah *side-vent*. Aliran keluar dan berputar kebelakang jarum lalu naik ke *outlet*. Aliran yang keluar dari jarum *side-vented* cenderung tidak beraturan. Pada jarum *open-ended* yang digunakan untuk metode tekanan negatif, aliran irigan berbentuk lurus menuju apikal. Area yang dicapai dengan metode tekanan negatif lebih luas dan lebih jauh jika dibanding tekanan positif jarum *side-vented* sehingga proses pertukaran irigan dan pembilasan lebih optimal.

Tekanan hisap pada sisi *outlet* untuk metode tekanan negatif memiliki pengaruh terhadap kecepatan aliran, *wall shear stress* dan tekanan dinamis pada proses irigasi. Tekanan hisap pada bagian *outlet* membantu irigan yang kecepatan alirannya akan melambat karena melawan gaya gravitasi untuk keluar dari saluran akar. Pada tekanan positif, aliran berpusat pada satu sisi dinding saluran akar. Perbedaan metode dan bentuk jarum tersebut mengakibatkan perbedaan banyak hal seperti *vortex*, panjang aliran balik dan distribusi kecepatan, *wall shear stress* serta tekanan dinamis. Visualisasi aliran dan grafik kecepatan terhadap posisi kedua metode ditunjukkan pada gambar 4.15 dan 4.16 untuk melihat perbedaan pola aliran dan kecepatan pada posisi apikal.

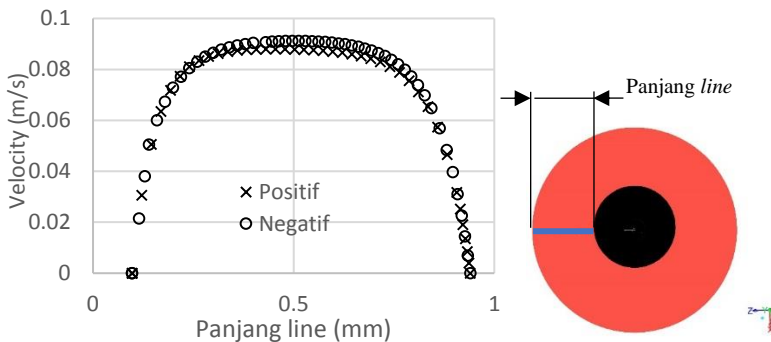


Gambar 4.15 Perbandingan kontur dan *pathlines* kecepatan metode (a) tekanan positif dan (b) tekanan negatif



Gambar 4.16 Grafik perbandingan kecepatan (a) dari ujung jarum hingga apikal dan (b) dari apikal hingga *cone orifice*

Grafik pada gambar 4.16 menunjukkan pada metode tekanan negatif lebih baik dalam hal seperti distribusi kecepatan karena mencapai apikal dan kecepatannya melebihi 0,1 m/s atau diatas garis putus-putus horizontal untuk terjadinya pertukaran irigan. Proses pengangkatan debris optimal hingga ke seluruh area dinding kanal. Kedalaman penyisipan jarum harus dibuat lebih dekat dari apikal jika ingin lebih efektif dalam pembersihan. Hal ini dapat dilihat juga pada gambar *pathlines* kedua metode dimana pada tekanan negatif mencapai ujung apikal sementara pada tekanan positif aliran telah berbalik menuju *outlet* sebelum sampai ke ujung apikal. *Trendline* bulat hanya sampai $L_c=2$ mm karena kedalaman penyisipan jarum ditetapkan 2 mm dari apikal sedangkan *trendline* silang sampai posisi 10,5 karena kedalam penyisipan jarum untuk irigasi tekanan negatif ditetapkan 10 mm dari orifis.

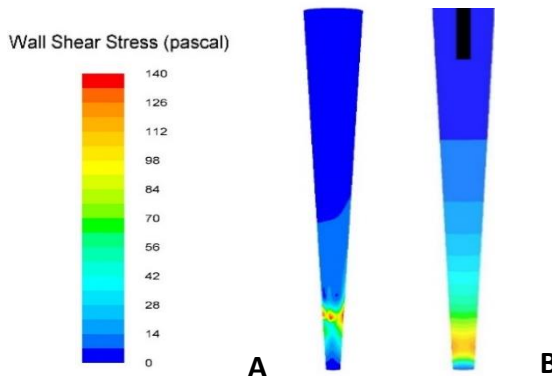


Grafik 4.17 Perbandingan kecepatan pada *cone orifice*

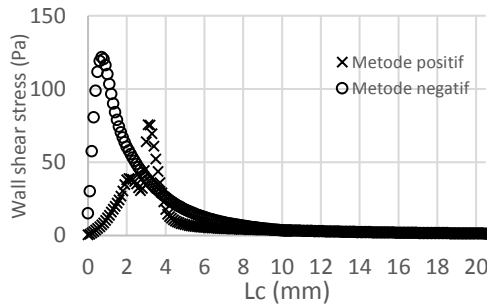
Gambar 4.17 menunjukkan grafik perbedaan kecepatan pada bagian *outlet* dari saluran akar. Pada metode positif, *line* diambil sepanjang saluran akar pada *outlet cone* yang sejajar dengan celah, sedangkan negatif diambil di samping jarum. Garis biru yang menunjukkan panjang *line* dibuat sepanjang dari dekat dinding jarum atau 0,098 mm hingga dinding *cone* yaitu 0,9408 mm searah

sumbu Z, karena nilai yang ingin diambil hanya pada bagian saluran akar saja tanpa mengambil distribusi kecepatan didalam jarum. Pertukaran irigan memenuhi syarat jika kecepatan lebih besar dari 0,1 m/s. Grafik menunjukkan kecepatan kedua metode tidak ada yang melebihi 0,1 m/s sehingga pertukaran irigan tidak memenuhi syarat pada bagian atas saluran akar. Fluida irigan keluar dengan prinsip meluber akibat fluida telah memenuhi volum dari saluran akar dan pada tekanan negatif fluida irigan keluar karena irigan telah memenuhi saluran akar dan dibantu dengan hisapan dari *cone orifice*.

Perbedaan tegangan geser dinding antara kedua metode terletak pada bagian nilai atau besaran dari setiap metode dan letak dari tegangan geser yang dialami oleh dinding saluran akar. Pada metode tekanan positif tegangan geser terbesar berada pada dinding di area sekitar celah jarum *side-vented* sedangkan pada metode tekanan negatif tegangan geser terbesar berada pada dinding dan apikal. Nilai tegangan geser pada metode tekanan negatif lebih besar dibanding tekanan positif dikarenakan kecepatan pada metode negatif lebih tinggi. Ilustrasi gambar dapat dilihat pada gambar 4.18 dan 4.19.



Gambar 4.18 Visualisasi kontur tegangan geser pada (a) metode tekanan positif dan (b) metode tekanan negatif

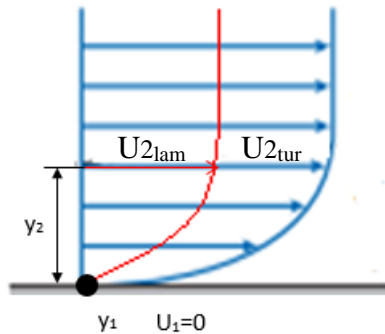


Gambar 4.19 Distribusi tegangan geser pada kedua metode

Fluida pada penelitian ini adalah *Newtonian* sehingga fluida ini tegangan gesernya berbanding lurus secara linier dengan gradien kecepatan pada arah tegak lurus dengan bidang geser. Jika nilai kecepatan besar maka tegangan geser juga akan semakin besar. Tekanan negatif memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan tekanan positif. Sesuai dengan teori mekanika fluida maka tegangan geser pada dinding saluran akar akan lebih besar untuk tekanan negatif dibanding tekanan positif. Persamaan fluida Newtonian untuk memperjelas pengaruh tegangan geser terhadap kecepatan adalah sebagai berikut:

$$\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}$$

Nilai μ atau viskositas absolut pada studi ini ditetapkan sama karena jenis fluida yang tidak berubah. Nilai U pada metode tekanan negatif lebih besar dengan nilai U untuk tekanan positif jika diambil pada satu posisi atau titik, sehingga distribusinya akan lebih panjang dan lapisan batasnya akan semakin lebar. Gambar 4.20 menunjukkan perbedaan lapisan batas dan tegangan geser pada 2 kecepatan berbeda yaitu kecepatan yang lebih tinggi (U_{tur}) dan yang lebih lambat (U_{lam}).



Gambar 4.20 Perbandingan gradien kecepatan

Sehingga nilai perbedaan tegangan geser jika dibandingkan antara kedua kecepatan menjadi:

$$U_{2tur} > U_{2lam}$$

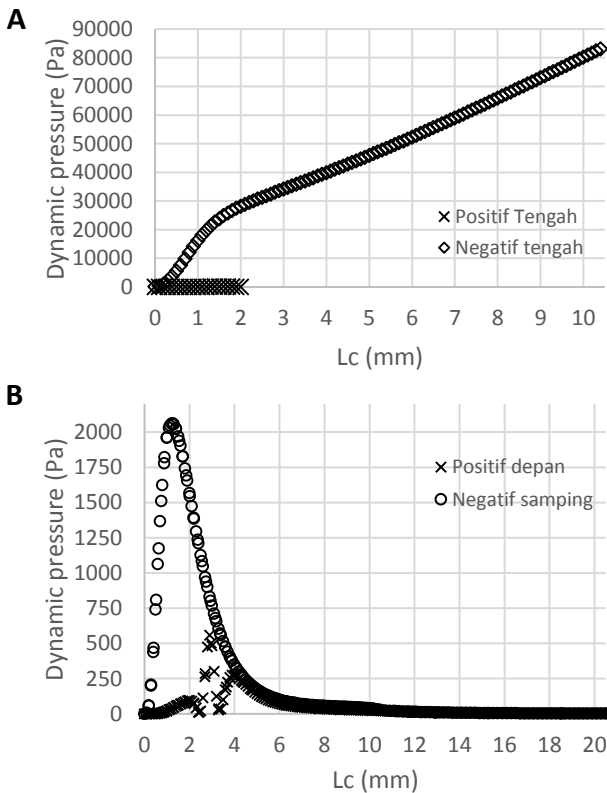
$$\mu \frac{(U_2 - U_1)_{tur}}{(y_2 - y_1)_{tur}} > \mu \frac{(U_2 - U_1)_{lam}}{(y_2 - y_1)_{lam}}$$

$$\tau y x_{2tur} > \tau y x_{2lam}$$

Dari rumus tersebut dapat disimpulkan nilai kecepatan yang tinggi akan menghasilkan gradien kecepatan yang lebih besar, sehingga tekanan negatif memiliki tegangan geser yang terbesar. Kecepatan yang tinggi memberikan momentum yang besar, sehingga energi yang dihasilkan untuk mengangkat debris lebih bersih dan pembersihan menjadi lebih efektif.

Perbedaan tekanan dinamis pada kedua metode yaitu pada nilai yang tertinggi dari tekanan dinamis yang dihasilkan. Perbandingan nilai tekanan ditampilkan dalam 2 buah grafik dimana grafik pertama menunjukkan grafik yang diambil pada bagian tengah *cone* dari ujung keluar jarum hingga apikal, sedangkan grafik yang lain diambil pada posisi samping jarum dari ujung apikal hingga *cone orifice*. Pada bagian tengah nilai tekanan

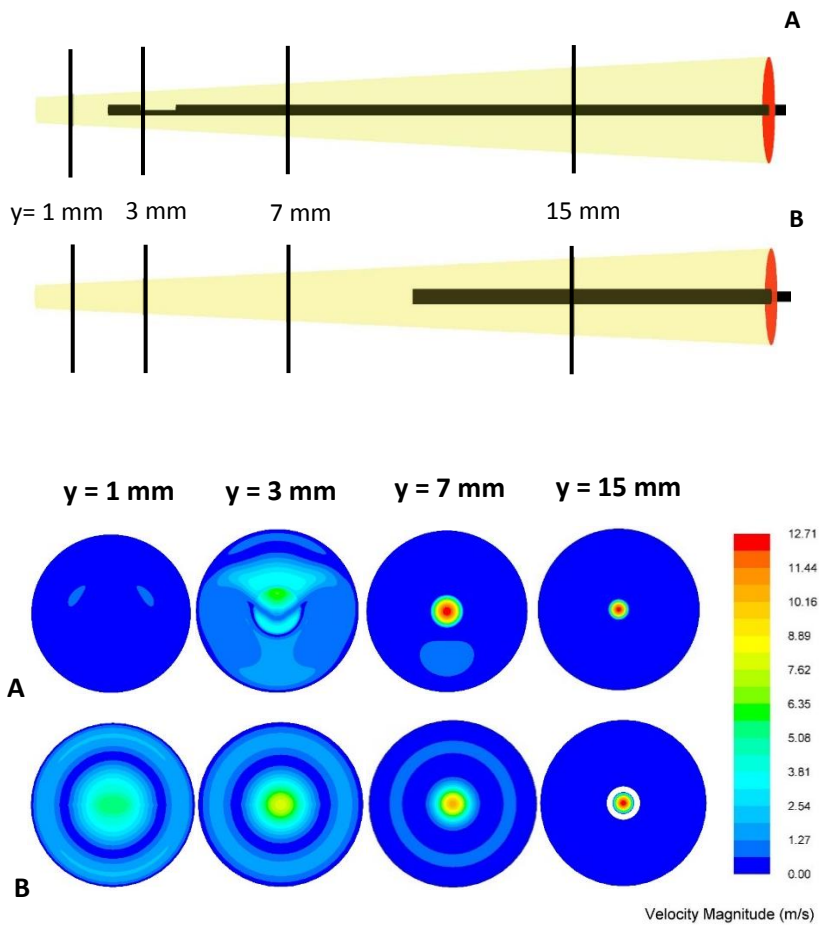
negatif berbeda jauh dengan tekanan positif. Nilai tekanan negatif terbesar yaitu 85101,80 Pa sementara pada tekanan negatif hanya 2100 Pa. hal ini disebabkan karena fluida *open-ended* keluar dari tengah dan memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Pada sisi samping jarum tekanan pada metode negatif sebesar 2000 Pa sedangkan tekanan positif sebesar 600 Pa. Data kuantitatif ditunjukkan oleh grafik pada gambar 4.20.



Gambar 4.21 Grafik distribusi tekanan dinamis pada kedua metode (a) Aliran menuju apikal, dan (b) Aliran meninggalkan saluran akar

Grafik 4.21 memperjelas data kualitatif tekanan dinamis kedua metode. Data diambil menggunakan *line/rake* dengan posisi yang sama seperti posisi pengambilan data untuk perbandingan kecepatan sebelumnya. Metode irigasi tekanan negatif memiliki tekanan yang lebih besar dibanding tekanan positif, tetapi nilai tekanan dinamis yang besar berada pada ujung jarum dan ketika pada bagian dinding apikal tekanan telah berkurang menjadi 40 Pa. Nilai tekanan dinamis ini aman untuk proses irigasi karena jika tekanan terlalu besar sangat berisiko bagi manusia. Nilai tekanan dinamis ini dipengaruhi oleh kecepatan aliran. Tekanan dinamis kedua metode masih cukup aman untuk dinding saluran akar.

Gambar 4.22 memvisualisasikan perbandingan kontur pada *surface cross-section* posisi y 1 mm, 3 mm, 7 mm dan 15 mm dari apikal untuk lebih memperjelas perbedaan profil aliran dan nilai kecepatannya. Aliran pada tekanan negatif memiliki kontur yang lebih jelas dibanding tekanan positif yang berarti kecepatannya cukup tinggi. Hal ini diakibatkan pola aliran yang terbentuk dari kedua metode menggunakan bentuk jarum yang berbeda. Pada posisi 1 mm dari apikal masih terlihat kontur berwarna biru muda yang merata pada irigasi tekanan negatif, sedangkan pada tekanan positif menunjukkan berwarna biru muda yang kecil yang berarti aliran sudah lambat. Pada posisi 3 mm dari apikal terlihat masih terdapat warna kuning untuk tekanan negatif, sedangkan pada tekanan positif hampir sudah tidak ada. Pada posisi 15 mm, kedua metode memiliki kontur yang sama yang berwarna biru yang berarti kecepatan pada posisi itu sudah sangat lambat. Maka dapat disimpulkan irigasi saluran akar menggunakan metode tekanan negatif lebih efektif dan optimal dibandingkan irigasi menggunakan tekanan positif ditinjau dari profil kecepatan, *wall shear stress* dan tekanan dinamis.



Gambar 4.22 Perbandingan *surface cross-section* metode (a) tekanan positif dan (b) tekanan negatif

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa yang telah dilakukan mengenai karakteristik aliran dalam saluran akar dengan tekanan positif dan tekanan negatif dengan *reynolds number* adalah 1376 maka didapatkan beberapa kesimpulan bahwa:

1. Setiap variasi panjang saluran akar untuk metode irigasi tekanan positif dimana kedalaman penyisipan ditetapkan 2 mm dari ujung apikal tidak terjadi perbedaan yang signifikan pada pola aliran, nilai kecepatan, tegangan geser dinding dan tekanan dinamis
2. Setiap variasi panjang saluran akar untuk metode irigasi tekanan negatif dimana kedalaman penyisipan ditetapkan 10 mm dari ujung orifice tidak terjadi perbedaan yang signifikan pada pola aliran, namun nilai kecepatan, wall shear stress dan tekanan dinamis cukup berbeda.
3. Variasi desain bentuk jarum yaitu *side-vented* dan *open-ended* terjadi perbedaan yang sangat signifikan pada pola aliran, nilai kecepatan, *wall shear stress* dan tekanan dinamis
4. Irigasi dengan metode tekanan positif menggunakan jarum *side-vented* tidak memenuhi syarat untuk terjadinya pertukaran irigan hingga ujung apikal. Jarak terjauh hanya 0,95 mm dari apikal sedangkan pada irigasi metode tekanan negatif pertukaran irigan mencapai ujung apikal.
5. Pembersihan dengan metode tekanan negatif lebih efektif dalam proses pembersihan dibanding metode tekanan positif dilihat dari kecepatan yang lebih tinggi dan tegangan geser dinding yang lebih besar.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil studi numerik yang dilakukan, terdapat beberapa hal yang perlu diperbaiki sehingga diperoleh hasil yang lebih baik untuk penelitian selanjutnya. Beberapa saran yang diajukan penulis diantaranya:

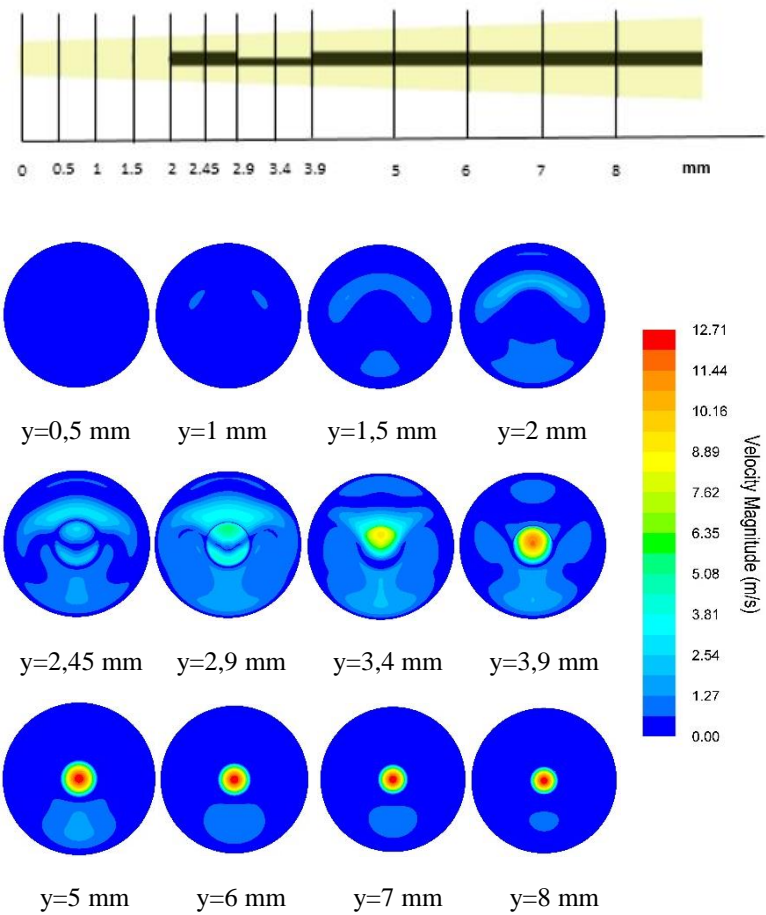
1. Melakukan sudi tentang pengaruh variasi posisi letak jarum yang tidak diletakkan ditengah
2. Melakukan studi mengenai irigasi saluran akar menggunakan ultrasonik
3. Menggunakan piranti lunak *CFD* komersial yang lebih *update* agar mendapatkan hasil yang lebih akurat dan lebih valid.
4. Menampilkan hasil foto *Scanning Electron Miscroscopy* (SEM) saluran akar sebelum dan sesudah dilakukan proses pembersihan dengan berbagai metode agar dapat terlihat perbandingan efektifitas pembersihannya.
5. Melakukan studi *root canal therapy* sebagai aliran 2 fasa dengan memodelkan juga *apical vapor lock* atau gelembung yang terjebak.
6. Melakukan studi dengan memodelkan debris juga sebagai *granular flow* agar terlihat proses pembilasan yang lebih *real* seperti kondisi aktualnya.

DAFTAR PUSTAKA

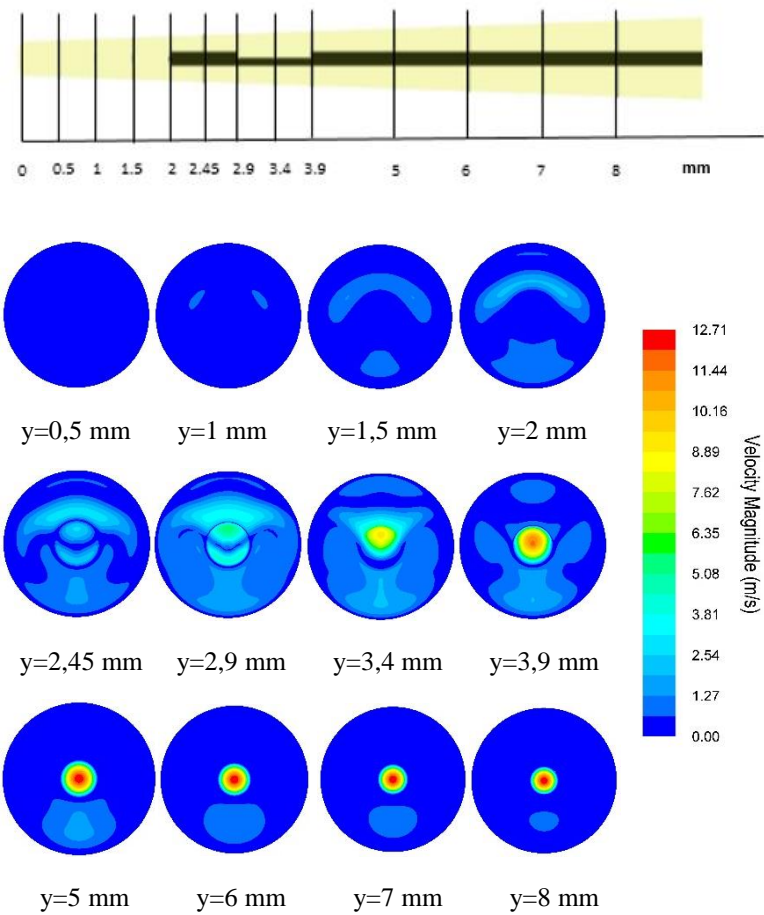
- Boutsioukis, C., Lambrianidis, T., Kastrinakis, E., 2009. "Irrigant Flow within A Prepared Root Canal using Various Flow Rates: A Computational Fluid Dynamics Study". **International Endodontic Journal** 42, 2: 144-55
- Boutsioukis, C., Lambrianidis, T., Verhaagen. B., *et al.*, 2010. "The effect of Needle -Insertion Depth on The Irrigant Flow in The Root Canal: Evaluation using An Unsteady Computational Fluid Dynamic Model". **Journal of Endodontics** 36, 10: 1664-8.
- Boutsioukis, C., Lambrianidis, T., Kastrinakis, E., Verhaagen. B., Versluis, M., Van Der Sluis, L.W., 2013. "Formation and Removal of Apical Vapor Lock during Syringe Irrigation: A Combined Experimental and Computational Fluid Dynamics Approach". **International Endodontic Journal** 47, 10: 191-201
- Boutsioukis, C., Verhaagen. B., Versluis, M., Kastrinakis, E., Wesselink, P.R., Van Der Sluis, L.W., 2010. "Evaluation of Irrigant Flow in The Root Canal using Different Needle Types by An Unsteady Computational Fluid Dynamics Model". **Journal of Endodontics** 36, 5: 875-9
- Chen, J.E., Nurbakhsh, B., Layton, G., Bussman, M., dan Kishen, A., 2013. "Irrigation Dynamics Associated with Positive Pressure, Apical Negative Pressure and Passive Ultrasonic Irrigations: A Computational Fluid Dynamics Analysis". **Australian Endodontic Journal**, 40:54-60.
- Fox, R.W. & McDonald, A. T dan Pritchard. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics**. 8th edition, John Wiley and Son, Inc.

- Fukumoto, Y., Kikuchi, I., Yoshioka, T., Kobayashi, C., & Suda, H., 2006. "An *Ex Vivo* Evaluation of A New Root Canal Irrigation Technique with Intracanal Aspiration". **International Endodontic Journal**, 39: 93-99
- Kocharian, T, 2010. "Root Canal Irrigation - An Engineering Analysis using Computational Fluid Dynamics". **A Thesis for Master of Engineering**, University of Toronto.
- Li, P., Zhang, D., Xie, Y.H., Lan, J.B., 2013. "Numerical Investigation of Root Canal Irrigation Adopting Innovative Needles with Dimple and Prostrution". **Acta of Bioengineering and Biomechanics** 15, 1: 43-40

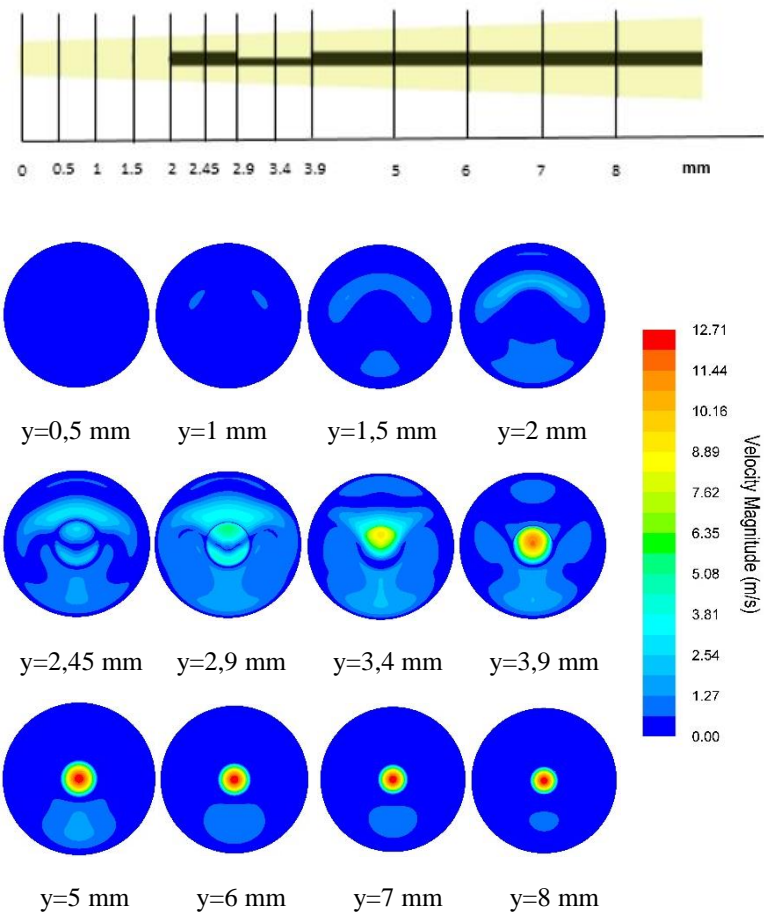
Lampiran 1. Visualisasi kecepatan dengan *surface cross-section* pada saluran akar 20,5 mm dengan metode tekanan positif



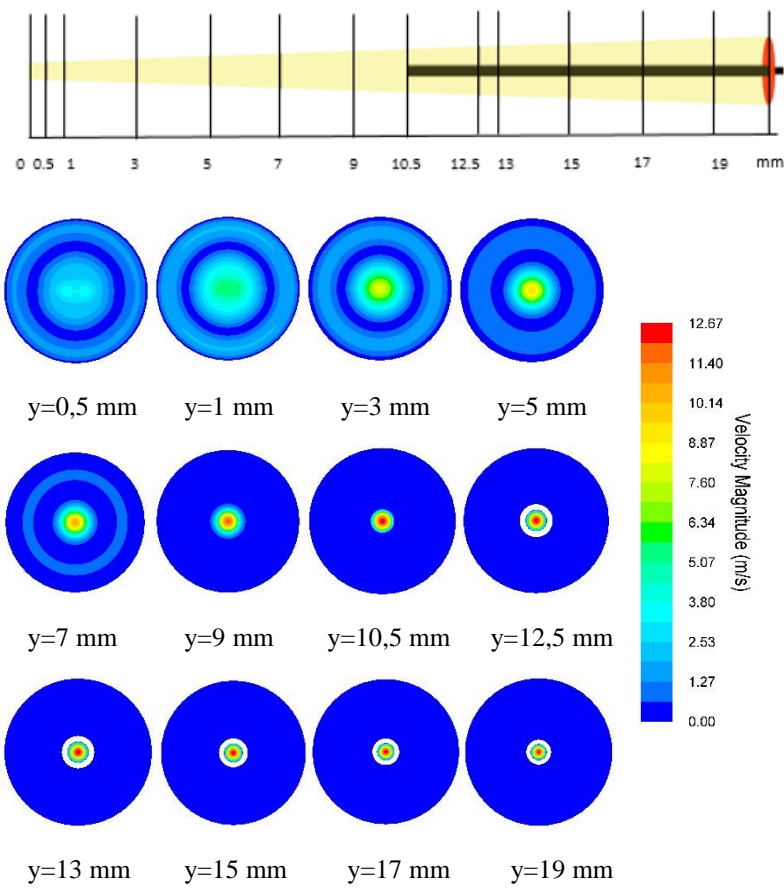
Lampiran 2. Visualisasi kecepatan dengan *surface cross-section* pada saluran akar 20,9 mm dengan metode tekanan positif



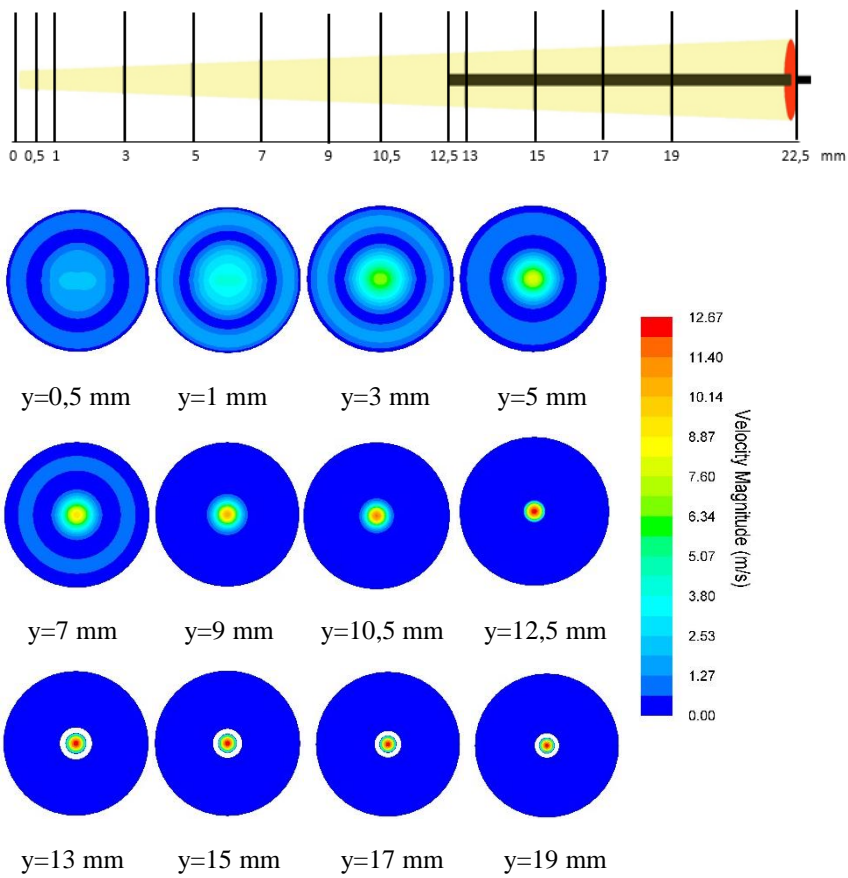
Lampiran 3. Visualisasi kecepatan dengan *surface cross-section* pada saluran akar 21,5 mm dengan metode tekanan positif



Lampiran 4. Visualisasi kecepatan dengan *surface cross-section* pada saluran akar 20,5 mm dengan metode tekanan negatif



Lampiran 5. Visualisasi kecepatan dengan *surface cross-section* pada saluran akar 22,5 mm dengan metode tekanan negatif



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BIODATA PENULIS



William Fernando dilahirkan di Jakarta, 31 Januari 1994, merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDK Paulus, Jakarta pada tahun 1999-2005. Penulis melanjutkan pendidikannya di SMP Santa Maria Fatima, Jakarta pada tahun 2005-2008 dan SMAN 53 Jakarta pada tahun 2008-2011. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan di Politeknik Negeri Jakarta jurusan Teknik Mesin pada tahun 2011-2014 dan pada tahun 2015 penulis melanjutkan studi S1 lintas jalur di Teknik Mesin ITS.

Penulis sempat aktif di beberapa kegiatan seminar yang diselenggarakan oleh jurusan dan juga pernah bergabung dalam berbagai kegiatan organisasi seperti KSM Mobil Listrik PNJ (2013). Di jurusan Teknik Mesin ini penulis mengambil bidang studi Konversi Energi. Penulis memilih untuk masuk Laboratorium Mekanika dan Mesin-Mesin Fluida dengan topik tugas akhir *Computational Fluid Dynamics* dibawah bimbingan Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. Pada tahun 2017 penulis menyelesaikan studi S1-nya. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email will.iamfsembiring@gmail.com

“Halaman ini sengaja dikosongkan”